

УДК 53.01, 53.087.4

DOI 10.25587/2222-5404-2024-21-2-46-57

Посвящается 100-летию Г. В. Скрипина

Динамика энергетического спектра солнечно-суточных вариаций интенсивности космических лучей в 22–25 циклах солнечной активности

П. Ю. Гололобов, С. К. Герасимова ✉, В. Г. Григорьев, Г. Ф. Крымский, В. И. Козлов, В. Е. Тимофеев

Институт космофизических исследований и астрономии им. Ю.Г. Шафера СО РАН, г. Якутск, Россия

✉ s_k_gerasimova@ikfia.ysn.ru

Аннотация. Непрерывно наблюдаемые наземными детекторами галактических космических лучей периодические 24-часовые колебания интенсивности называются солнечно-суточными вариациями. Природа этих вариаций заключается в существовании в межпланетной среде анизотропного пространственного распределения галактических космических лучей, которая возникает в процессе взаимодействия этих частиц с гелиосферой. Считается, что физическими факторами, ответственными за наблюдаемую анизотропию галактических космических лучей, являются процессы конвекции, диффузии и их дрейфа. Сочетание этих факторов определяет основные параметры солнечно-суточных вариаций, такие как амплитуда, фаза и энергетический спектр. Для исследования энергетического спектра солнечно-суточных вариаций использованы данные измерений мюонных телескопов Якутского спектрографа космических лучей им. А. И. Кузьмина и станции Нагоя (Япония). Подход к исследованию основан на идее метода скрещенных телескопов, изначально предназначенного для учета температурного эффекта. Из-за разницы приемных характеристик скрещенных северных и южных направлений вышеуказанных мюонных телескопов регистрируемые ими вариации интенсивности чувствительны к изменению энергетического спектра солнечно-суточных вариаций. Это свойство использовано для оценки динамики энергетического спектра солнечно-суточных вариаций за 22–25 циклов солнечной активности. Анализ полученных данных показал, что в последнем минимуме солнечной активности в 2018–2021 гг. наблюдалась аномально ранняя фаза солнечно-суточных вариаций. Для исследования этого явления проведено моделирование отношения и разности фаз пары северных и южных скрещенных направлений для обоих мюонных телескопов при различных видах и значениях энергетического спектра солнечно-суточных вариаций. Сопоставление модельных расчетов и наблюдательных данных позволило установить, что в периоды минимумов солнечной активности в положительной полярности общего магнитного поля Солнца наблюдается существенное смягчение энергетического спектра солнечно-суточных вариаций. Обсуждаются причины обнаруженного явления.

Ключевые слова: космические лучи, анизотропия, мюонный телескоп, солнечная активность, энергетический спектр, гелиосфера, модуляция, вариации, температурный эффект, приемный вектор.

Для цитирования: Гололобов П. Ю., Герасимова С. К., Григорьев В. Г., Крымский Г. Ф., Козлов В. И., Тимофеев В. Е. Динамика энергетического спектра солнечно-суточных вариаций интенсивности космических лучей в 22–25 циклах солнечной активности. *Вестник СВФУ*. 2024, Т. 21, №2. С. 46–57. DOI: 10.25587/2222-5404-2024-21-2-46-57

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего профессионального образования Российской Федерации (проект № FWRS-2021-0012). В работе использовались данные измерений станции космических лучей Якутск, входящей в состав уникальной научной установки «Российская национальная наземная сеть станций космических лучей» [<https://ckp-rf.ru/usu/433536/>]. Авторы благодарят мировой центр данных мюонных детекторов университета Синсю (Япония) за предоставление данных многонаправленных мюонных телескопов станции Нагоя [<http://cosray.shinshu-u.ac.jp/crest/DB/Public/main.php>].

Dedicated to the centennial of G. V. Skripin

Dynamics of the energy spectrum of solar-diurnal variations in the intensity of cosmic rays in 22–25 cycles of solar activity

P. Yu. Gololobov, S. K. Gerasimova ✉, **V. G. Grigoryev, G. F. Krymsky, V. I. Kozlov, V. E. Timofeev**

Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy of Siberian Branch

of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia

✉ s_k_gerasimova@ikfia.ysn.ru

Abstract. Periodic 24-hour variations in the intensity of galactic cosmic rays, continuously observed by ground-based detectors, are called solar diurnal variations. The nature of these variations lies in the existence in the interplanetary medium of an anisotropic spatial distribution of galactic cosmic rays, which arises during the interaction of these particles with the heliosphere. It is believed that the physical factors responsible for the observed anisotropy of galactic cosmic rays are the processes of convection, diffusion and their drift. The combination of these factors determines the main parameters of solar diurnal variations, such as amplitude, phase and energy spectrum. To study the energy spectrum of solar-diurnal variations, we used measurement data from muon telescopes of the Yakutsk Cosmic Ray Spectrograph after A.I. Kuzmin and Nagoya stations (Japan). The research approach is based on the idea of the crossed telescope method, originally designed to take into account the temperature effect. Due to the difference in the receiving characteristics of the crossed northern and southern directions of the above muon telescopes, the intensity variations recorded by them are sensitive to changes in the energy spectrum of solar-diurnal variations. This property was used to assess the dynamics of the energy spectrum of solar-diurnal variations for 22–25 cycles of solar activity. Analysis of the data obtained showed that in the last minimum of solar activity in 2018–2021. An anomalously early phase of solar-diurnal variations was observed. To study this phenomenon, we simulated the ratio and phase difference of a pair of northern and southern crossed directions for both muon telescopes for different types and values of the energy spectrum of solar-diurnal variations. A comparison of model calculations and observational data has made it possible to establish that during periods of minimum solar activity in the positive polarity of the general magnetic field of the Sun, a significant softening of the energy spectrum of solar-diurnal variations is observed. The reasons for the discovered phenomenon are discussed.

Keywords: cosmic rays, anisotropy, muon telescope, solar activity, energy spectrum, heliosphere, modulation, variations, temperature effect, receiving vector.

For citation: Gololobov PYu, Gerasimova SK, Grigoryev VG, Krymsky GF, Kozlov VI, Timofeev VE. Dynamics of the energy spectrum of solar-diurnal variations in the intensity of cosmic rays in 22–25 cycles of solar activity. *Vestnik of NEFU*. 2024, Vol. 21, No. 2. Pp. 46–57. DOI: 10.25587/2222-5404-2024-21-2-46-57

The work was carried out with financial support from the Ministry of Science and Higher Professional Education of the Russian Federation (project No. FWRS-2021-0012). In this work, we used measurement data from cosmic ray station Yakutsk, which are part of the Unique Scientific Facility « Russian National Ground-Based Network of Cosmic Ray Stations» [<https://ckp-rf.ru/usu/433536/>]. The authors are grateful to the Global Muon Detector Network data in Shinshu University (Japan) for making the data of Nagoya muon telescope [<http://cosray.shinshu-u.ac.jp/crest/DB/Public/main.php>].

Введение

Галактические космические лучи (ГКЛ) в процессе распространения вглубь гелиосферы непрерывно подвергаются воздействию ряда факторов солнечного происхождения, основными из которых являются межпланетное магнитное поле (ММП) и солнечный ветер. Такое взаимодействие приводит к формированию анизотропного

углового распределения ГКЛ, наблюдаемого в околоземном космическом пространстве, которое проявляется в данных наземных детекторов космических лучей (КЛ) в виде периодических 24-часовых колебаний интенсивности, называемых солнечно-суточными вариациями (ССВ). Амплитуды ССВ составляют в среднем величину около 1% от общей интенсивности. Несмотря на столь малую амплитуду, ССВ представляют особый интерес. Это вызвано тем, что на основе изучения свойств ССВ можно получать важные сведения об изменениях физических характеристик межпланетной среды. Так, удается производить косвенную оценку ряда неизмеримых напрямую модуляционных параметров [1, 2].

Основной теорией, объясняющей ССВ, является конвективно-диффузионный механизм [3], в которой предполагается, что в случае стационарного распределения ГКЛ в гелиосфере должно соблюдаться условие равновесия между конвективным выносом ГКЛ и их диффузией вглубь гелиосферы. В результате теория предсказывает существование устойчивого 18-часового максимума ССВ с амплитудой порядка 0,5%, которое успешно подтверждается экспериментом. Между тем многолетние долговременные измерения ГКЛ показали, что ССВ испытывают значимые амплитудно-фазовые изменения с циклом солнечной активности [4]. В частности, амплитуда ССВ испытывала положительную корреляцию с уровнем солнечной активности, обнаруживая 11-летние вариации, а фаза – 22-летние вариации, связанные с магнитной цикличностью Солнца. Причем в периоды минимума СА в эпохи положительной полярности общего магнитного поля Солнца (ОМПС) наблюдалось смещение фазы на раннее время относительно 18 ч. Подобное смещение частично объяснялось влиянием дрейфа ГКЛ в гелиосфере [5]. В частности, в периоды положительной полярности ОМПС ГКЛ дрейфуют из полярных областей к нижним гелиоширотам в сторону от Солнца, а в эпоху отрицательной, наоборот, вдоль токового слоя вглубь гелиосферы с последующим выходом через полярные области.

Экспериментальные оценки энергетического спектра ССВ на основе данных наземных детекторов КЛ были предприняты, например, в работах [6, 7]. В целом рассматривался спектр следующего вида: $f(E) = E^\gamma$, при $E \leq E_0$ и $f(E) = 0$ при $E > E_0$, где параметры E_0 и γ находятся из сопоставления данных наблюдений с теоретическими расчетами. Указанные выше работы показали, что спектр в среднем имеет плоский вид ($\gamma = 0$) с верхним порогом обрезания при $E_0 = 100$ ГэВ. При этом E_0 изменяется в зависимости от цикла солнечной активности, достигая 50 ГэВ в минимуме и 150 ГэВ в максимуме, которая, по-видимому, имеет функциональную связь с напряженностью ММП [8]. Предпринятая позже попытка [1] подтвердила плоский вид спектра, и значения γ варьировались в узком интервале от -0,3 до +0,5.

Исследование ССВ при помощи наземных детекторов КЛ затрудняется тем фактом, что они предоставляют лишь косвенную информацию о распределении КЛ в межпланетном пространстве, т. к. регистрируют лишь продукты взаимодействия КЛ с земной атмосферой. Более того, такие детекторы чаще всего являются интегральными и регистрируют частицы вне зависимости от их энергий. КЛ, являясь заряженными частицами, испытывают существенное влияние геомагнитного поля, которая искривляет траектории их движения и для некоторых из них оказывается непреодолимым барьером, приводя к формированию запрещенных направлений. Кроме того, процесс генерации продуктов взаимодействия КЛ с атмосферой и их последующее распространение к поверхности Земли довольно сложен и зависит от типа регистрируемых частиц, их направлений распространения и энергии. Поэтому подход к исследованию КЛ на основе наземных детекторов требует правильного понимания процессов взаимодействия КЛ с геомагнитным полем и атмосферой Земли. Для учета этих факторов был разработан метод приемных векторов [9]. Метод сводит все факторы к так называемым «приемным векторам» и позволяет оценивать вариации КЛ в межпланетном пространстве с учетом индивидуальных характеристик прибора.

Однако учет лишь приемных векторов оказывается недостаточным из-за наличия известного «температурного эффекта». Особенно это касается детекторов КЛ, регистрирующих мюонную компоненту продуктов взаимодействия КЛ с атмосферой. Для учета эффекта требуется знание плотностей температурных коэффициентов [10] и высотного хода температурного режима атмосферы. И если плотности температурных коэффициентов вполне успешно рассчитываются теоретически, то высотный ход атмосферы подразумевает непрерывные экспериментальные измерения температуры шарами-зондами над пунктом наблюдения, которые сегодня не проводятся. Поиск решения такой проблемы привел к созданию метода «скрещенных телескопов» [11, 12]. Суть метода заключается в рассмотрении пары направлений телескопов с идентичными диаграммами направленности, но разнесенных по азимуту. В этом случае вариации регистрируемой интенсивности на обеих станциях будут содержать одинаковый вклад любых атмосферных эффектов, включая температурный.

В данной работе предлагается использование метода скрещенных телескопов для исследования динамики энергетического спектра ССВ в цикле солнечной активности.

Данные

В работе использованы данные мюонного телескопа якутского спектрографа КЛ им. А. И. Кузьмина, функционирующего с 1972 г. [13]. Якутский спектрограф является уникальным прибором, позволяющим исследовать КЛ в широком диапазоне энергий в одной точке наблюдения ($61^{\circ}59' \text{ N}$, $129^{\circ}41' \text{ E}$, высота над уровнем моря – 95 м). Широта диапазона энергий обеспечивается расположением приборов как на поверхности земли, так и на глубинах 7, 20 и 40 м водного эквивалента. Каждый телескоп состоит из 52 газоразрядных пропорциональных счетчиков СГМ-14 и работает в режиме тройных совпадений. Регистрация частиц производится с вертикального направления, а также с направлений к северу и югу под зенитными углами 30° и 60° . В настоящей работе привлечены данные наземного мюонного телескопа, регистрирующего частицы, приходящие с южного и северного направлений под углом 30° к зениту.

Также в работе привлечены данные многонаправленного мюонного телескопа Нагоя ($35^{\circ}09' \text{ N}$, $136^{\circ}58' \text{ E}$, 77 м над уровнем моря) [14], регистрирующего КЛ с 1971 г. Прибор состоит из двух слоев сцинтилляционных счетчиков, регистрирующих мюоны по принципу двойных совпадений. 72 счетчика с общей эффективной площадью 36 м^2 позволяют регистрировать КЛ с 17 независимых направлений. В частности, в данной работе нами были использованы данные измерений направлений Север 30° и Юг 30° .

Исследование проводилось во временном диапазоне с 1990 по 2022 гг. Такой продолжительный временной размах позволяет рассматривать динамику поведения анизотропии ССВ как в 11-летнем цикле солнечной активности (22–25 циклы солнечной активности), так и в 22-летнем цикле общего магнитного поля Солнца.

На рис. 1 представлены годовые вариации амплитуды (а) и фазы (б) ССВ, наблюдаемых мюонными телескопами Якутск и Нагоя под зенитными углами 30° к северу и югу. На этом же рис. представлен годовой ход чисел солнечных пятен (в). Видно хорошую корреляцию амплитуды и фазы с солнечной активностью. Амплитуда для обеих станций обнаруживает схожую динамику и величину. В отличие от нее, фаза обнаруживает не столь однозначное поведение. В частности видно, что фаза вариаций интенсивности, зарегистрированная с северного направления, указывает на существенно раннее время, чем с южного направления. При этом обнаруживается интересная особенность: если для данных мюонных телескопов станции Нагоя эта разность в показаниях северных и южных направлений постоянна в течение всего рассмотренного периода, то для станции Якутск эта разница уменьшается в периоды минимума солнечной активности, когда полярность ОМПС положительна (1995–1997 гг. и 2018–2021 гг.). Именно эти временные интервалы будут объектами нашего пристального внимания в дальнейшем. Особенно второй из них,

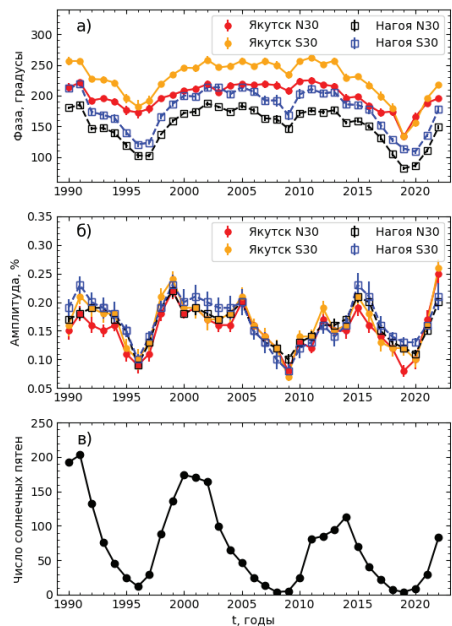


Рис. 1. Годовой ход амплитуды (а) и фазы (б) ССВ по данным мюонных телескопов Якутск и Нагоя, число солнечных пятен (в) за 1990–2022 гг.
Fig. 1. Annual variations of SDV amplitude (a) and phase (b) from data of the Yakutsk and Nagoya muon telescopes, sunspot number (c) for 1990-2022.

который пришелся на период аномально низкой солнечной активности и обнаруживает наиболее сильный сдвиг фазы ССВ на раннее время.

Метод исследования

Подход к определению энергетического спектра основан на идее метода скрещенных телескопов [18, 19], в частности на выдвинутой в 1970-х гг. идее использования скрещенных телескопов в определении истинных вариаций КЛ свободных от атмосферных эффектов. Действительно, вклад атмосферных эффектов в интенсивность КЛ, измеряемую парой телескопов, расположенных в одной географической точке с одинаковыми диаграммами направленности, но разнесенных по азимуту, является практически одинаковым. Поэтому разница регистрируемых интенсивностей будет иметь внеатмосферный эффект. В этом случае такая пара направлений скрещенных телескопов будет регистрировать одну и ту же анизотропию, а возникающая разница будет обусловлена прежде всего влиянием геомагнитного поля.

Пусть интенсивность КЛ в межпланетной среде будет описываться следующим выражением:

$$I(\theta,\varphi)=\sum_{m=0}^{\infty}\sum_{n=0}^m\left(a_n^m\cos m\varphi+ib_n^m\sin m\varphi\right)P_n^m(\sin\theta), \tag{1}$$

где $0\leq n\leq m<\infty$, $P_n^m(\sin\theta)$ – присоединенные полиномы Лежандра, θ , φ – географические широта и долгота.

Если представить компоненты a_n^m и b_n^m в виде многомерного вектора $A=(a_n^m,b_n^m)$, то регистрируемая наземным детектором интенсивность будет иметь вид:

$$A\cdot R=I', \tag{2}$$

где $\mathbf{R} = (x_n^m, y_n^m)$ – приемные вектора, а I' – регистрируемая интенсивность. И, если $z_n^m = x_n^m + iy_n^m$, то:

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

В вышеуказанном выражении $W(E, \theta)$ – коэффициенты связи, описывающие чувствительность детектора к энергии КЛ, $N(\theta, \varphi)$ – диаграммы направленности, определяемые геометрией прибора, $\Psi(\theta, \varphi, E)$, $\Phi(\theta, \varphi, E)$ – асимптотические углы прихода частиц, $f_n(E)$ – энергетический спектр вариаций.

Будем полагать, что гелиосфера является симметричной и анизотропия КЛ будет также симметрична относительно гелиоэкватора. В этом случае ССВ будут возникать исключительно за счет экваториальной анизотропии, т. е. компонент вектора анизотропии a_1^1 и b_1^1 . В этом случае наблюдаемая разность фаз между, к примеру, направлениями Юг 30° и Север 30° будет определяться выражением $\Delta\varphi = \varphi_{Юг30} - \varphi_{Север30}$, где $\varphi = \frac{y_1^1}{x_1^1}$, а отношения амплитуд, соответственно, будут равны $\alpha = \frac{z_{1,Север30}^1}{z_{1,Юг30}^1}$.

Возвращаясь к уравнению (2), заметим, что единственным неизвестным членом в ней является $f_n(E)$. В нашем случае мы рассматриваем энергетический спектр суточной анизотропии $f_1(E)$. Остальные параметры, связанные с энергетическими чувствительностями и конструкцией приборов, являются известными, и их табличные значения для мюонных телескопов Якутск и Нагоя представлены на сайтах <https://ysn.ru/ipm/characteristics/> и https://www.ysn.ru/smt/characteristics_GMDN, соответственно. Таким образом, задавая различные виды $f_1(E)$, мы можем моделировать $\Delta\varphi$ и α . Отметим, что в этом случае мы будем получать не только качественные, но и количественные значения для $\Delta\varphi$ и α .

Полученные результаты

Рассмотрим разность фаз $\Delta\varphi$ и отношения амплитуд α направлений Север 30° и Юг 30° мюонных телескопов Якутск и Нагоя (рис. 2) за 1990–2022 гг. Видно, что $\Delta\varphi$ по данным обеих станций несколько отличается. В частности в 1995–1997 гг. и 2018–2021 гг. $\Delta\varphi$ сильно уменьшалось вплоть до нуля, в то время как разность фаз Нагойского телескопа остается неизменным. В остальные годы $\Delta\varphi$ по данным Якутской станции равен около 35° , а $\Delta\varphi$ по данным Нагойи – около 25° . При этом отношения амплитуд α обеих станций равны в среднем 1, однако в некоторые моменты варьируются до значений 1,25 (Нагоя) и 0,65 (Якутск).

Причины обнаруженных выше вариаций $\Delta\varphi$ и α обусловлены, очевидно, влиянием геомагнитного поля на КЛ. КЛ, являясь заряженными частицами, при входе в геомагнитное поле, испытывают снос, величина которого определяется свойствами поля и энергией частицы. Для оценки величины сноса используются асимптотические углы прихода частиц [15]. Рассчитанные асимптотические углы прихода частиц по направлениям Север 30° и Юг 30° для мюонных телескопов Нагоя и Якутск представлены на рис. 3. Как видно, $\Delta\varphi$ для Якутского телескопа уменьшается с уменьшением энергии частиц, в то время как $\Delta\varphi$ для Нагойского телескопа, напротив, увеличивается с уменьшением энергии. Это позволяет предположить, что обнаруженные вариации $\Delta\varphi$ обусловлены изменениями энергетического спектра ССВ, зависящими от состояния гелиосферы в циклах магнитной и солнечной активности.

Каким же должен быть энергетический спектр ССВ? Для оценки вида спектра применим моделирование ожидаемых вариаций северных и южных направлений телескопов с

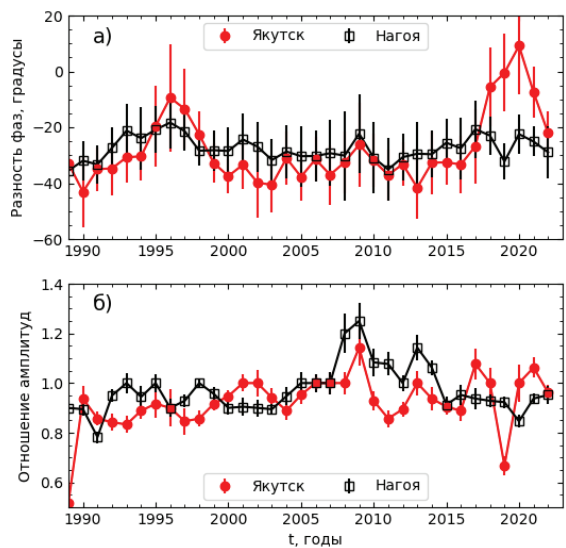


Рис. 2. Разность фаз $\Delta\phi$ и отношения амплитуд α направлений Север 30 и Юг 30 мюонных телескопов Якутск и Нагоя за 1990–2022 гг.
Fig. 2. Phase difference $\Delta\phi$ and amplitude ratio α of the North 30 and South 30 directions of the Yakutsk and Nagoya muon telescopes for 1990–2022.

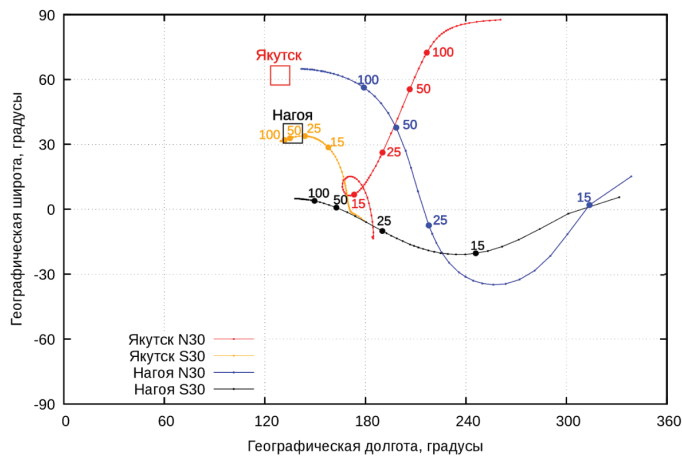


Рис. 3. Асимптотические углы прихода частиц для мюонных телескопов станций Якутск (красные линии) и Нагоя (черные линии). Буквами N и S возле точек обозначены направления Север 30° и Юг 30°, соответственно, а последующими за ними цифрами обозначены энергии частиц в ГэВ
Fig. 3. Asymptotic angles of particle arrivals for the muon telescopes of Yakutsk (red lines) and Nagoya (black lines) stations. The letters N and S near the points denote the directions North 30° and South 30°, respectively, and the numbers following them denote the particle energies in GeV

помощью метода приемных векторов. Рассмотрим два различных вида спектра. На рис. 4 представлено модельное распределение фазы и амплитуды интенсивности КЛ для спектра степенного вида $f_1(E) = E^\gamma$. Видно, что для Якутского МТ $\Delta\phi$ уменьшается со смягчением спектра γ от 0 до -3 на 35 градусов, достигая 5 градусов. Для Нагоя МТ зависимость $\Delta\phi$ и γ слабая и при тех же значениях γ меняется от 26 до 21 градуса. При этом относительные амплитуды α для Якутска и Нагоя в среднем составляют 1 и 0,8, соответственно.

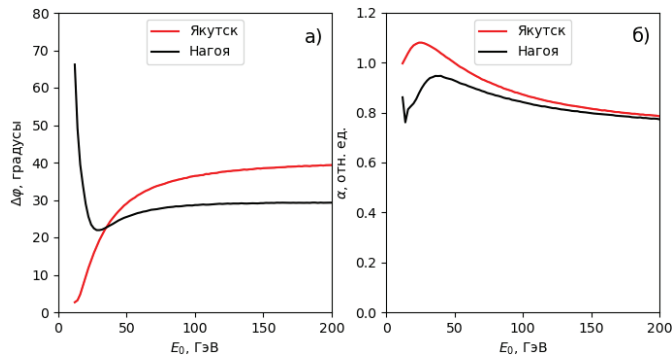


Рис. 4. Результаты моделирования разностей фаз $\Delta\varphi$ и отношений амплитуд α для мюонных телескопов станций Якутск и Тикси при различных показателях спектра α
Fig. 4. Modelling results of phase differences $\Delta\varphi$ and amplitude ratios α for the muon telescopes of Yakutsk and Tiksi stations at different spectral indices γ

Сопоставление экспериментальных данных на рис. 2 с вышеуказанными расчетами для степенного энергетического спектра позволяет заключить, что такой вид спектра является непригодным. Прежде всего это связано с тем, что наблюдаемые в эксперименте вариации $\Delta\varphi$ будут предполагать смягчение спектра до -3 и ниже, что означало бы практически полное отсутствие анизотропии в области высоких энергий. Однако подземные телескопы, расположенные глубоко под Землей, обнаруживают достаточно значимые амплитуды суточных вариаций. В частности можно упомянуть работы [16], где суточная анизотропия обнаруживалась по данным подземного мюонного телескопа Матсуширо на глубине 220 м в. э. и с эффективной энергией 0,6 ТэВ, а также [17], где подземный комплекс мюонных телескопов Якутского спектрографа космических лучей им. А. И. Кузьмина с эффективными энергиями до 260 ГэВ также регистрировал значимые суточные вариации. Кроме этого, измеренные значения α для Нагойи близки к значениям 0,9–1,0, что выше расчетных значений, меняющихся в пределах 0,8.

Поведение параметров $\Delta\varphi$ при плоском энергетическом спектре с верхним порогом обрезания вида $f_1(E) = \text{const}$, при $E \leq E_0$ и $f_1(E) = 0$ при $E > E_0$, будет иным для двух станций. Результаты моделирования для такого вида спектра представлены на рис. 5. Видно, что $\Delta\varphi$ и α при энергиях $E_0 > 50$ ГэВ для обеих станций МТ приблизительно

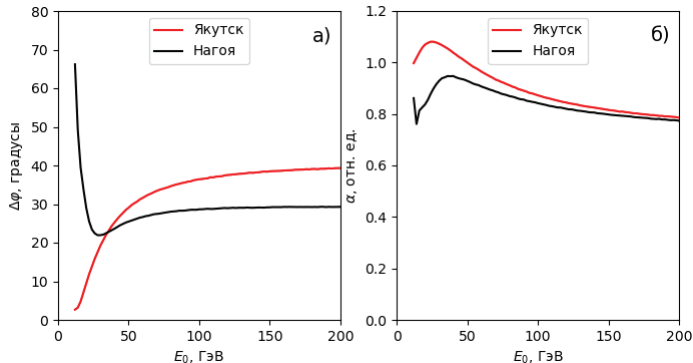


Рис. 5. Результаты моделирования разностей фаз $\Delta\varphi$ и отношений амплитуд α для мюонных телескопов станций Якутск и Тикси при различных значениях верхнего порога обрезания E_0 энергетического спектра ССВ

Fig. 5. Modelling results of phase differences $\Delta\varphi$ and amplitude ratios α for the muon telescopes of Yakutsk and Tiksi stations at different values of the upper cut-off threshold E_0 of the SDV energy spectrum

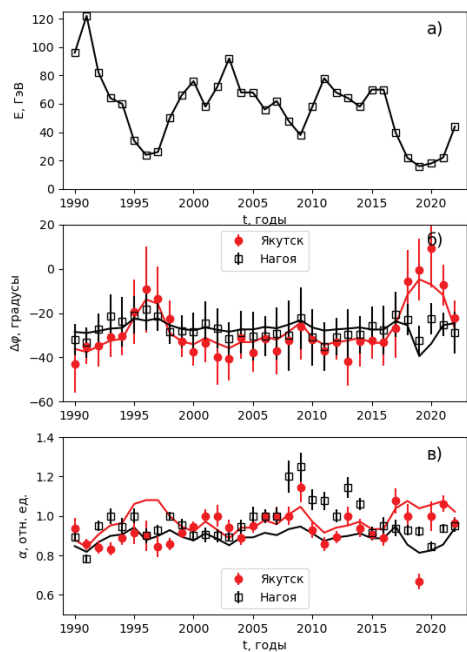


Рис. 6. Динамика верхнего порога обрезания энергетического спектра E_0 (а) за 1990–2022 гг.

В панелях (а) и (б) представлены сопоставление модельных расчетов (сплошные кривые) и экспериментальных измерений (точки) разности фаз $\Delta\phi$ и отношений амплитуд α

Fig. 6. Dynamics of the upper cut-off threshold of the energy spectrum E_0 (a) for 1990–2022. Panels (a) and (b) present a comparison of model calculations (solid curves) and experimental measurements (dots) of the phase difference $\Delta\phi$ and amplitude ratios α

одинаковы. Однако для энергий E_0 до 50 ГэВ картина другая: $\Delta\phi$ для Якутского МТ обнаруживает уменьшение вплоть до 0 градусов, в то время как $\Delta\phi$ для МТ Нагоя увеличивается, достигая при пороге вертикального геомагнитного обрезания около 60 градусов; α для Якутского МТ изменяется в пределах 0,95–1,1, а для МТ Нагоя уменьшается с значения 0,9 до 0,35 с уменьшением энергии.

Рассмотренную модель применим для описания экспериментальных данных. Для этого при помощи метода наименьших квадратов будем определять значение E_0 , наиболее успешно описывающее измеренные значения $\Delta\phi$ и α . Полученные таким образом значения E_0 представлены на рис. 6. Как видно, E_0 в среднем составляет значение, близкое к 70 ГэВ, однако в минимумах солнечной активности смещается в область малых энергий, особенно в периоды положительной полярности ОМПС. Отметим, что последний минимум соответствует значению $E_0 = 20$ ГэВ, что является минимальным за весь рассмотренный период.

Обсуждение

Несмотря на качественное согласие результатов моделирования с экспериментом, есть расхождения, которые накладывают сомнения на полученные результаты. Это особенно касается поведения α по данным мюонного телескопа Нагоя в 2008–2014 гг., когда он достиг значений 1,3, значительно превышающих максимальные значения модельных расчетов. Примечательным является то, что в этот период мы наблюдали наиболее глубокий минимум солнечной активности за всю историю наблюдений КЛ, когда на поверхности Солнца долгое время не наблюдались солнечные пятна. Кроме этого, в 2018–2021 гг. теоретически ожидаемое уменьшение α до значений 0,7 также не обнаруживается в экспериментальных данных.

Из вышеуказанного справедливо предполагать, что причиной разногласий теории и эксперимента может быть сложный вид реального энергетического спектра суточных вариаций КЛ. Однако не менее очевидной причиной является присутствие анизотропии КЛ, направленной вне экваториальной плоскости. Действительно, такая анизотропия должна непрерывно присутствовать в данных наземных измерений из-за годичных изменений наклона оси вращения Земли и ее гелиоширотного положения. С другой стороны, если предполагать, что гелиосфера имеет симметричную структуру, то при усреднении значений анизотропии за год указанные эффекты должны нивелироваться. Если же предполагать, что гелиосфера имеет асимметричную структуру, то будет наблюдаться дополнительный вклад вне экваториальной анизотропии. При этом такая анизотропия проявляла бы себя по-разному в данных станций, расположенных в южной и северной полусферах Земли. Указания на существование северо-южной асимметрии гелиосферы было представлено в работах [18, 19]. Считается, что средняя величина сдвига составляет 3° – 4° и направлена к югу от плоскости солнечного экватора. Пока неизвестно, является ли столь малый эффект достаточным для объяснения обнаруженной несогласованности теории и эксперимента. Для исследования этого данных мюонных телескопов Якутск и Нагоя недостаточно, и необходимо дополнительно привлекать данные южных станций.

Заключение

1. Определены амплитуда и фаза ССВ по данным разнонаправленных МТ Якутск и Нагоя за 1990–2022 гг. Показано, что в 2018–2021 гг. наблюдалось аномальное смещение фазы ССВ на раннее время.
2. При помощи метода приемных векторов произведено моделирование ССВ для направлений Север 30° и Юг 30° мюонных телескопов Якутск и Нагоя при различных видах энергетического спектра.
3. Сопоставление модельных расчетов с экспериментальными данными позволило заключить, что аномальное смещение фазы ССВ на раннее время связано со смягчением энергетического спектра.

Л и т е р а т у р а

1. Hall DL, Duldig ML, Humble JE. Cosmic-ray modulation parameters derived from the solar diurnal variation. *Apstophys. J.*, 1997;482(2):1038–1049. DOI: 10.1086/304158.
2. Munakata K, Kozai M, Kato C, et al. Long-term variation of the solar diurnal anisotropy of galactic cosmic rays observed with the Nagoya multi-directional muon detector. *Astrophys. J.*, 2014;791(22). DOI: 10.1088/0004-637X/791/1/22.
3. Крымский, Г. Ф. Диффузионный механизм суточных вариаций галактических космических лучей / Г. Ф. Крымский // Геомагнетизм и аэронавигация. – 1964. – Т. 4. – С. 763–769.
4. Скрипин, Г. В. 22-летние вариации суточной анизотропии космических лучей / Г. В. Скрипин, В. П. Мамрукова // Изв. РАН. Сер. физ. – 1993. – Т. 57. – № 7. – С. 51–54.
5. Krymsky GF, Krivoschapkin PA, Mamrukova VP, et al. 11-year and 22-year variations in the anisotropy of galactic cosmic rays. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.*, 2007;71(7):971–973.
6. Ahluwalia HS, Riker JF. Secular changes in the upper cut-off rigidity of the solar diurnal anisotropy of cosmic rays. *Planet. Space Sci.*, 1987;35(1):39–43. DOI: 10.1016/0032-0633(87)90142-5.
7. Pomerantz MA, Duggal SP. The cosmic ray solar diurnal anisotropy. *Space Sci. Rev.*, 1971;12:75–130. DOI: 10.1007/BF00172130.
8. Ahluwalia HS. A correlation between IMF and the limiting primary rigidity for the cosmic ray diurnal anisotropy. *Geophys. Res. Lett.*, 1992;19(6):633–636. DOI: 10.1029/92GL00525.
9. Крымский, Г. Ф. Распределение космических лучей и приемные векторы детекторов. I. / Г. Ф. Крымский, А. М. Алтухов, А. И. Кузьмин [и др.] // Геомагнетизм и аэронавигация. – 1966. – Т. 6. – № 6. – С. 991–996.
10. Дорман, Л. И. Вариации космических лучей / Л. И. Дорман. – Москва : Гостехиздат, 1957. – 492 с.

11. Скрипин, Г. В. Изучение анизотропии космических лучей методом скрещенных телескопов / Г. В. Скрипин, П. А. Кривошапкин, Г. Ф. Крымский, В. А. Филиппов // Геомагнетизм и аэронавтика. – 1965. – Т. 5. – № 5. – С. 817–825.
12. Скрипин, Г. В. Исследование анизотропии космических лучей методом скрещенных телескопов: дисс. ... к. ф.-м. н. / Скрипин Григорий Васильевич. – Якутск, 1965. – 184 с.
13. <http://ysn.ru/ipm/yktMT00/> (дата обращения 13.11.2023)
14. http://cosray.shinshu-u.ac.jp/crest/DB/Documents/Docs/DetectorDescription_NGY.pdf (дата обращения 13.11.2023)
15. Дорман, Л. И. Космические лучи в магнитном поле Земли / Л. И. Дорман, В. С. Смирнов, М. И. Тясто. – Москва : Наука, 1971. – 400 с.
16. 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;712(2):1100. DOI: 10.1088/0004-637X/712/2/1100.
17. Крымский, Г. Ф. Энергетические характеристики анизотропии галактических космических лучей / Г. Ф. Крымский, П. А. Кривошапкин, С. К. Герасимова [и др.] // Изв. РАН. Сер. физ. – 2003. – Т. 67. – № 4. – С. 492–495.
18. Крымский, Г. Ф. Северо-южная асимметрия гелиосферы по наблюдениям космических лучей / Г. Ф. Крымский, П. А. Кривошапкин, В. П. Мамрукова, С. К. Герасимова // Письма в АЖ, 2009. – Т. 35. – № 5. – С. 372–376.
19. Virtanen II, Mursula K. Asymmetry of solar polar fields and the southward shift of HCS observed by Ulysses, JGR, 2010;115, A09110.

References

1. Hall DL, Duldig ML, Humble JE. Cosmic-ray modulation parameters derived from the solar diurnal variation. *Astrophys. J.*, 1997;482(2):1038-1049. DOI: 10.1086/304158.
2. Munakata K, Kozai M, Kato C, et al. Long-term variation of the solar diurnal anisotropy of galactic cosmic rays observed with the Nagoya multi-directional muon detector. *Astrophys. J.*, 2014;791(22). DOI: 10.1088/0004-637X/791/1/22.
3. Krymsky GF. Diffusion mechanism of diurnal variation of galactic cosmic rays. *Geomagn. Aeron.*, 1964;4:763–769. (in Russ.)
4. Skripin GV, Mamrukova VP. 22-year variations of the diurnal anisotropy of cosmic rays. *Russian Academy of Sciences, Series Physics (ISSN 0367-6765)*, 1993;57(7):51-54.
5. Krymsky GF, Krivoshapkin PA, Mamrukova VP, et al. 11-year and 22-year variations in the anisotropy of galactic cosmic rays. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.*, 2007;71(7):971–973.
6. Ahluwalia HS, Riker JF. Secular changes in the upper cut-off rigidity of the solar diurnal anisotropy of cosmic rays. *Planet. Space Sci.*, 1987;35(1):39-43. DOI: 10.1016/0032-0633(87)90142-5.
7. Pomerantz MA, Duggal SP. The cosmic ray solar diurnal anisotropy. *Space Sci. Rev.*, 1971;12:75-130. DOI: 10.1007/BF00172130.
8. Ahluwalia HS. A correlation between IMF and the limiting primary rigidity for the cosmic ray diurnal anisotropy. *Geophys. Res. Lett.*, 1992;19(6):633-636. DOI: 10.1029/92GL00525.
9. Krymsky GF, Altukhov AM, Kuzmin AI, et al. Distribution of cosmic rays and receiving vectors of detectors. *Geomagnetism and aeronomy*, 1966;6(6):991–996. (in Russ.)
10. Dorman LI. Variations of cosmic rays. Moscow: Gostekhizdat, 1957:492.
11. Skripin GV, Krivoshapkin PA, Krymsky GF, et al. Study of cosmic ray anisotropy using crossed telescopes method. *Geomagnetism and aeronomy*, 1965;5(5):817-825. (in Russ.)
12. Skripin GV. Study of cosmic rays anisotropy by crossed telescopes method. Candidate dissertation (Nuclear physics). Yakutsk, 1965:184. (in Russ.)
13. <http://ysn.ru/ipm/yktMT00/> (Accessed 13 Nov. 2023)
14. http://cosray.shinshu-u.ac.jp/crest/DB/Documents/Docs/DetectorDescription_NGY.pdf (Accessed 13 Nov. 2023)
15. Dorman LI, Smirnov VS, Tyasto MI. Cosmic rays in Earth's magnetic field. Moscow: Nauka, 1971:400.

16. 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. *Apstophys. J.*, 2010;712(2):1100. DOI: 10.1088/0004-637X/712/2/1100.

17. Krymsky GF, Krivoschapkin PA, Gerasimova SK, et al. Energy characteristics of galactic cosmic ray anisotropy. *Russian Academy of Science, Series Physics*, 2003;67(4):492-495. (in Russ.)

18. Krymsky GF, Krivoschapkin PA, Mamrukova VP, et al. North-south asymmetry of the heliosphere from cosmic-ray observations, *Astron. Lett.*, 2009;35(5):333-337.

19. Virtanen II, Mursula K. Asymmetry of solar polar fields and the southward shift of HCS observed by Ulysses. *JGR*, 2010;115, A09110.

ГОЛОЛОБОВ Пётр Юрьевич – м. н. с., Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера СО РАН.

E-mail: gpeter@ikfia.ysn.ru

Petr Y. GOLOLOBOV – Junior Researcher, ShICRA SB RAS.

ГЕРАСИМОВА Сардаана Кимовна – к. ф.-м. н., с. н. с., Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера СО РАН.

E-mail: s_k_gerasimova@ikfia.ysn.ru

Sardana K. GERASIMOVA – Cand. S. (Phys. & Math.), Senior Researcher, ShICRA SB RAS.

ГРИГОРЬЕВ Владислав Георгиевич – к. ф.-м. н., с. н. с., Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера СО РАН.

E-mail: grig@ikfia.ysn.ru

Vladislav G. GRIGORYEV – Cand. S. (Phys. & Math.), Senior Researcher, ShICRA SB RAS.

КРЫМСКИЙ Гермоген Филиппович – советник РАН, академик, д. ф.-м. н., Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера СО РАН.

E-mail: krymsky@ikfia.ysn.ru

Germogen F. KRYMSKY – Counselor of RAS, Academician, Dr. S. (Phys. & Math.), ShICRA SB RAS.

КОЗЛОВ Валерий Игнатьевич – д. ф.-м. н., в. н. с., Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера СО РАН.

E-mail: cosmoprognoz@ikfia.ysn.ru

Valery I. KOZLOV – Dr. S. (Phys. & Math.), Leading Researcher, ShICRA SB RAS.

ТИМОФЕЕВ Владислав Егорович – к. ф.-м. н., с. н. с., Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера СО РАН.

E-mail: vetimofeev@ikfia.ysn.ru

Vladislav E. TIMOFEEV – Cand. S. (Phys. & Math.), Senior Researcher, ShICRA SB RAS.