

УДК 523-1/-8:524.1

О СОЛНЕЧНЫХ МИНИМУМАХ 20/21–24/25 И ЗАВИСИМОСТИ МАКСИМАЛЬНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ОТ ГЕЛИОСФЕРНЫХ ФАКТОРОВ

© 2021 г. М. Б. Крайнев¹, *, М. С. Калинин¹, О. П. М. Аслам²,
М. Д. Нгобени^{2,3}, М. С. Потгитер⁴

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

²Северо-Западный Университет, Центр космических исследований, Поттсдам, ЮАР

³Северо-Западный Университет, Школа физических и химических наук, Ммабато, ЮАР

⁴Институт экспериментальной и прикладной физики, Университет Христиана Альбрехта, Киль, Германия

*E-mail: mkrainev46@mail.ru

Поступила в редакцию 24.05.2021 г.

После доработки 01.06.2021 г.

Принята к публикации 28.06.2021 г.

Рассмотрены фазы минимума цикла солнечной активности по пятнам на Солнце, в гелиосфере и в интенсивности галактических космических лучей (ГКЛ). Определены моменты максимальной интенсивности ГКЛ в минимумах последних пяти циклах (включая текущий), соответствующие основные гелиосферные факторы и связи между ними. Рассчитана и проанализирована зависимость спектра протонов ГКЛ около Земли от гелиосферных факторов на их линейном тренде в минимумах 21/22, 22/23, 23/24 (1987, 1997, 2009 гг.) с акцентом на поведении энергии кроссовера для последовательных минимумов.

DOI: 10.31857/S0367676521100197

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время Солнце, его наружный слой гелиосфера и галактические космические лучи (ГКЛ) в этом слое находятся в фазе минимума между циклами активности по пятнам 24 и 25 (минимум 24/25), причем для процессов в гелиосфере в этот период очень важна полоидальная ветвь солнечной активности [1]. В этой фазе в определенные моменты интенсивность ГКЛ достигает максимальных значений, после чего начинается ее уменьшение. Надежно установлено, что величина максимальной интенсивности зависит от полярности гелиосферного магнитного поля (ГМП) A , причем для протонов низких энергий ($T = 200$ ГэВ) интенсивность выше при $A > 0$, чем при $A < 0$, а для высоких энергий ($T > \text{несколько ГэВ}$) – наоборот. Эту закономерность обычно выражают, говоря о пересечении спектров (cross-over) для $A > 0$ и $A < 0$ при энергиях кроссовера T_{co} около 1 ГэВ ([2–4] и ссылки в них). Отметим, что при этом часто имеют в виду пересечение спектров в последовательных минимумах с противоположной полярностью A .

Для понимания процесса модуляции ГКЛ солнечной активностью представляет интерес, какими

гелиосферными характеристиками и под действием какого механизма определяются особенности спектра ГКЛ в эти моменты. Количественное описание и исследование процесса модуляции ГКЛ в гелиосфере обычно проводится путем численного решения краевой задачи для функции распределения ГКЛ, причем коэффициенты этой краевой задачи моделируют гелиосферные факторы и процессы взаимодействия с ними ГКЛ [3].

Наиболее полная информация о характеристиках гелиосферы, важных для модуляции ГКЛ (скорости солнечного ветра (СВ) и ГМП), и о самой интенсивности имеется для орбиты Земли в последних пяти минимумах 20/21 – 24/25. Ранее для минимумов 21/22, 22/23, 23/24 (1987, 1997, 2009 гг.) было установлено, что в некоторых характеристиках гелиосферы в эти периоды наблюдается хорошо выраженный линейный тренд и оценен спектр ГКЛ в следующем солнечном минимуме 24/25 в предположении продолжения этого тренда [5]. Это предположение не оправдалось, но сама проблема корреляции между разными гелиосферными факторами и влияния этой корреляции на характеристики ГКЛ нам представляется важной.

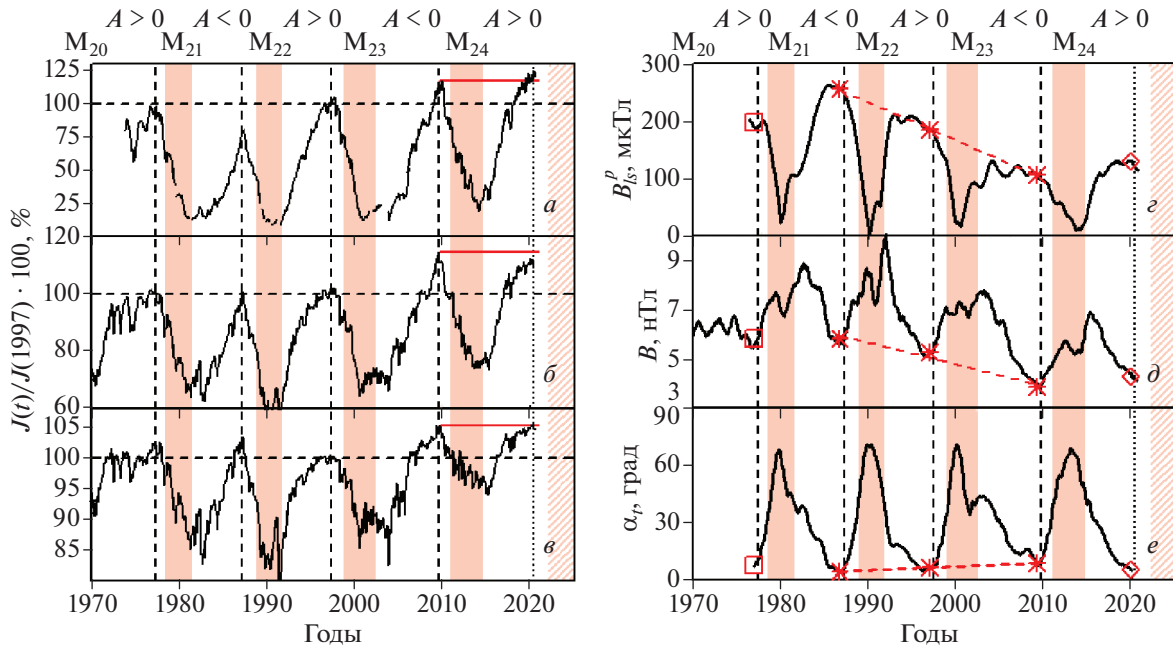


Рис. 1. Временная зависимость интенсивности ГКЛ, полоидальной ветви солнечной активности и гелиосферных характеристик в районе орбиты Земли в 1970–2020 гг. Периоды инверсии ГМП показаны вертикальными затененными полосами [1], а над панелями указаны времена максимумов пятнообразовательных циклов и преимущественная полярность ГМП A . Вертикальными штриховыми линиями отмечены моменты максимальной интенсивности ГКЛ в минимумах 21/22–23/24, а вертикальным пунктиром – в текущем минимуме 24/25. Горизонтальные прямые отмечают уровень максимальной интенсивности, достигнутый в минимуме 23/24. Левые панели a – $в$: нормированная на 100% в 1997 г. интенсивность протонов ГКЛ разных энергий. Правые панели z – e : характеристики полоидальной ветви активности Солнца и ГМП. Подробности см. в тексте.

В статье сначала рассматриваются данные наблюдений, определяются моменты (t_{Jmax}) максимума интенсивности ГКЛ (в том числе в текущем минимуме 24/25), соответствующие значения основных гелиосферных факторов (в $t_{HS} = t_{Jmax} - 0.5$) и связи между ними. Затем описывается и обсуждается изменение расчетного спектра протонов ГКЛ из-за тренда напряженности ГМП и наклона (тилта) гелиосферного токового слоя (ГТС) к экватору в солнечных минимумах 21/22–23/24 (т.е. из-за корреляции указанных факторов) с акцентом на поведении энергии кроссовера. При этом здесь мы имеем в виду пересечение спектров не в последовательных минимумах, а при разной полярности ГМП и одинаковых прочих условиях.

МАКСИМАЛЬНАЯ ИНТЕНСИВНОСТЬ ГКЛ И ГЕЛИОСФЕРНЫЕ ФАКТОРЫ

На левых панелях рис. 1 показано поведение нормализованной к 1997 г. (предыдущий солнечный минимум с $A > 0$) интенсивности ГКЛ низких (a , $T = 200$ МэВ, IMP8, ACE [11]), средних ($б$, $T > 100$ МэВ, [12]) и высоких ($в$, $T \geq 10$ ГэВ, [13]) энергий в 1970–2020 гг. около Земли.

На правых панелях рис. 1, иллюстрирующих вариации в те же годы солнечных и гелиосферных

факторов, важных для модуляции ГКЛ, кроме моментов максимальной интенсивности ГКЛ значками отмечены усредненные значения этих факторов за предшествующий моменту год (время распространения солнечного ветра от Солнца до границы гелиосферы). В поведении всех приведенных факторов для минимумов 21/22–23/24 (звездочки) заметен выраженный линейный тренд (штриховые наклонные прямые), а именно напряженность ГМП B (рис. 1д, [14]) в эти три минимума монотонно уменьшалась, а тилт ГТС α_t (рис. 1е, [15]) – рос. Отметим, что такая зависимость $\alpha_t(B)$ согласуется с эмпирической моделью [6] при учете высокой корреляции в поведении B и величины магнитного поля в полярных областях Солнца B_{ls}^p (рис. 1z, [15], см. [1]).

ОПИСАНИЕ СПЕКТРА ГКЛ НА ТРЕНДЕ ГЕЛИОСФЕРНЫХ ФАКТОРОВ

Описание поведения ГКЛ в гелиосфере осуществляется путем решения транспортного уравнения для функции распределения частиц с граничными и начальными условиями (см. [3, 4, 7, 9]). Коэффициенты транспортного уравнения представляют собой модели важных для модуляции

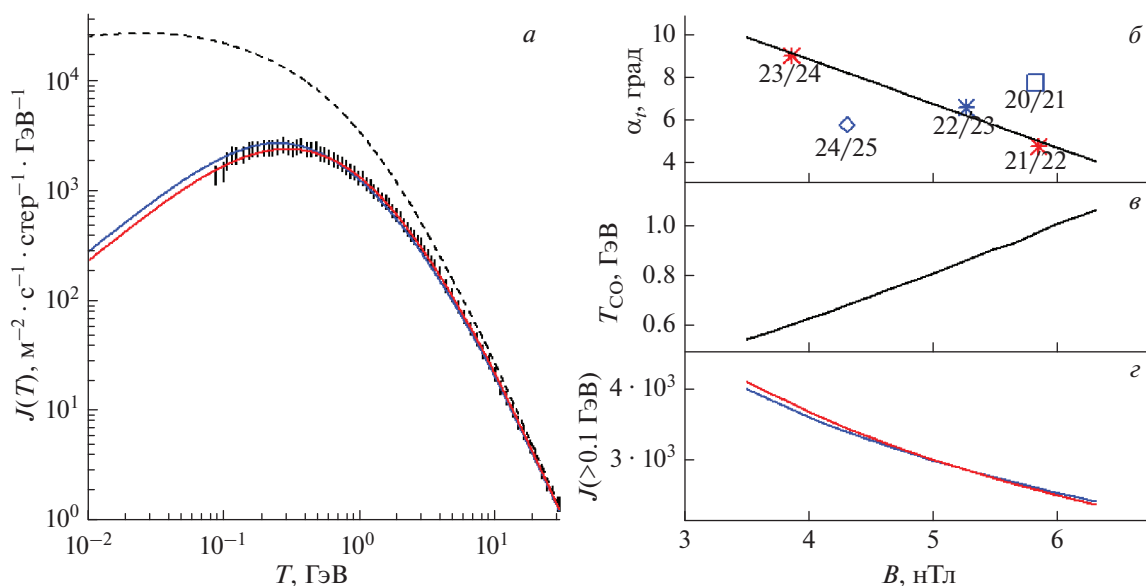


Рис. 2. Описание характеристик спектра протонов ГКЛ в моделях [4, 7, 9]. Левая панель *a*: спектры протонов, рассчитанные в данной работе, и наблюдаемый спектр на орбите Земли в минимуме 23/24. Штриховой кривой показан локальный межзвездный спектр протонов согласно [7]. Правые панели *б–г*: зависимость характеристик ГКЛ от напряженности ГМП B при условии линейной связи $\alpha_t(B)$, показанной прямой линией на панели *б*. Менее насыщенными (красными) кривыми показан расчетный спектр при полярности ГМП $A < 0$, а более насыщенной (синей) – при $A > 0$. Подробности см. в тексте.

ГКЛ гелиосферных факторов (скорость СВ, регулярное ГМП) и процессов взаимодействия с ними ГКЛ (тензор диффузии ГКЛ на флуктуациях и скорость дрейфа в регулярном ГМП). Большинство пакетов для моделирования ГКЛ очень детализированы и хорошо описывают данные наблюдения. На рис. 2*a* вертикальными штрихами показан спектр протонов, измеренный магнитным спектрометром PAMELA на орбите Земли в минимуме 23/24 (2009 г., $A < 0$) [8], а сплошной линией – энергетический спектр протонов, рассчитанный с использованием набора наблюдаемых гелиосферных характеристик $S_{obs} = \{\alpha_t, B, A\}$ и набора других (описательных) параметров S_{descr} необходимых для хорошего описания спектра. Видно, что расчетный спектр очень хорошо описывает наблюдения. Кроме того, показан также спектр протонов при полярности ГМП $A > 0$ и видно, что энергия кроссовера $T_{co} > 0.5$ ГэВ. Отметим, что использованная модель хорошо описывают спектры ГКЛ по данным PAMELA и в другие периоды, однако с несколько отличными наборами S_{descr} [4, 7, 9].

В данной статье нас интересует зависимость максимальной интенсивности от соответствующих наблюдаемых гелиосферных характеристик при том же наборе описательных параметров, в частности, как может проявляться в деталях энергетического спектра уменьшение тилта ГТС с ро-

стом напряженности ГМП, обсуждавшееся в предыдущем разделе. На рис. 2*б*, помимо линейной зависимости $\alpha_t(B)$ для минимумов 21/22–23/24, отмечены пары $(B, \alpha_t(B))$ для всех минимумов с их номерами. На рис. 2*в* для указанного линейного тренда $\alpha_t(B)$ показана энергия кроссовера, которая изменяется в пределах $0.55 < T_{co}, \text{ ГэВ} < 1.1$. Ясно, что при низких энергиях, $T < 0.55$ ГэВ, интенсивность протонов при $A > 0$ будет выше (а при высоких энергиях, $T > 1.1$ ГэВ, – ниже), чем при $A < 0$ во всем диапазоне $(B, \alpha_t(B))$. Поведение интенсивности ГКЛ средних энергий (точнее, интегральной интенсивности $J(T > 100 \text{ МэВ})$), которую можно оценивать по данным РБМ [10], для обоих знаков полярности ГМП A показана на рис. 2*г* и видно, что кривые близки друг к другу $\left(\frac{|J_{A>0} - J_{A<0}|}{J_{A>0} + J_{A<0}} \ll 1\right)$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Уменьшение ширины зоны секторной структуры с ростом напряженности ГМП, хорошо коррелирующей с напряженностью высокоширотных магнитных полей Солнца, отражает ведущую роль в гелиосфере в периоды минимума площади пятен полоидальной ветви солнечной активности. В текущем минимуме 24/25 интенсивность

ГКЛ, по-видимому, достигла максимума. Влияние зависимости тилта ГТС от напряженности ГМП, $\alpha_r(B)$, в минимумах 21/22–23/24, на интенсивность протонов ГКЛ в районе орбиты Земли, согласно нашим расчетам, приводит к систематическому изменению энергии кроссовера, а именно, к ее увеличению с ростом B . Для интегральной интенсивности $J(T > 100 \text{ МэВ})$ расчеты демонстрируют малую разницу между $A > 0$ и $A < 0$, т.е. для этой характеристики модуляция ГКЛ слабо чувствительна к смене полярности ГМП.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект № 18-02-00582а) и гранта РФФИ-NRF (проект № 19-52-60003-ЮАР-т. М.Д. Нгобени благодарен Национальному исследовательскому фонду ЮАР за частичную поддержку в рамках Joint Science and Technology Research Collaboration между ЮАР и Россией (грант № 118915).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крайнев М.Б. // Солн.-земн. физ. 2019. Т. 5. № 4. С. 12; Krainev M.B. // Solar-Terr. Phys. 2019. V. 5. No. 4. P. 10.
2. Свиржевский Н.С., Базилевская Г.А., Калинин М.С. и др. // Изв. РАН Сер. физ. 2017. Т. 81. № 2. С. 181; Svirzhevsky N.S., Bazilevskaya G.A., Kalinin M.S. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 81. No. 2. P. 162.
3. Potgieter M.S. // Living Rev. Solar Phys. 2013. V. 10. No. 3.
4. Potgieter M.S., Vos E.E. // Astron. Astrophys. 2017. V. 601. Art. No. A23.
5. Крайнев М.Б., Базилевская Г.А., Калинин М.С. и др. // Геомагн. и аэроном. 2018. Т. 58. № 2. P. 177; Krainev M.B., Bazilevskaya G.A., Kalinin M.S. et al. // Geomagn. Aeronomy. 2018. V. 58. No. 2. P. 169.
6. Krainev M.B., Makarova V.V. // Proc. of the "Solar and Solar-Terrestrial Physics" (Pulkovo, St.-Petersburg, 2008). P. 183.
7. Bisschoff D., Potgieter M.S., Aslam O.P.M. // Astrophys. J. 2019. V. 878. No. 1. P. 59.
8. Adriani O., Barbarino G.C., Bazilevskaya G.A. et al. // Astrophys. J. 2013. V. 765. P. 91.
9. Aslam O.P.M., Bisschoff D., Potgieter M.S. et al. // Astrophys. J. 2019. V. 873. No. 70. P. 1.
10. Стожков Ю.И., Свиржевский Н.С., Базилевская Г.А. и др. // Препринт ФИАН им. П.Н. Лебедева. 2007. № 14. С. 77.
11. <http://www.srl.caltech.edu>.
12. https://sites.lebedev.ru/en/DNS_FIAN.
13. <http://cr0.izmiran.ru/mosc>.
14. <http://omniweb.gsfc.nasa.gov>.
15. <http://wso.stanford.edu>.

On the sunspot minima 20/21–24/25 and the dependence of maximum galactic cosmic ray intensity on the heliosphere factors

M. B. Krainev^{a,*}, M. S. Kalinin^a, O. P. M. Aslam^b, D. Ngoben^{b,c}, M. S. Potgieter^d

^aLebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia

^bCenter for Space Research, North-West University, Potchefstroom, South Africa

^cSchool of Physical and Chemical Sciences, North-West University, Mmabatho, South Africa

^dInstitute for Experimental and Applied Physics, Christian Albrechts University, Kiel, Germany

*e-mail: mkrainev46@mail.ru

The phases of minima of the sunspot cycles are considered on the Sun, in heliosphere and in the galactic cosmic rays (GCR) intensity. The moments of the maximum GCR intensity are determined for the last five sunspot minima including the current one, as well as the corresponding main heliosphere factors and relations between them. The dependence of the proton GCR spectra near the Earth on the heliosphere factors for their linear trend in the minima 21/22, 22/23, 23/24 (1987 1997, and 2009) is calculated and discussed with the special attention on the energy of crossover.