

УДК 524.1.1-352

МОДУЛЯЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ В ПЕРИОД АНОМАЛЬНО НИЗКОЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

© 2021 г. Ю. И. Стожков^{1,2, *}, В. С. Махмутов^{1,2}, Г. А. Базилевская¹,
Н. С. Свиржевский¹, А. К. Свиржевская¹, М. В. Филиппов¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

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

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Долгопрудный, Россия

*E-mail: stozhkovi@lebedev.ru

Поступила в редакцию 25.03.2021 г.

После доработки 22.04.2021 г.

Принята к публикации 28.05.2021 г.

Обсуждается долговременная вариация галактических космических лучей в положительных и отрицательных фазах 22-летнего солнечного магнитного цикла, в том числе в период аномально низкой солнечной активности 2008–2020 гг. В отрицательные фазы имеет место пересоединение магнитных силовых линий солнечного и галактического магнитных полей. В положительные фазы существует магнитный барьер между этими полями, который необходимо учитывать при описании модуляции галактических космических лучей.

DOI: 10.31857/S0367676521090301

ВВЕДЕНИЕ

При описании долговременной модуляции космических лучей (далее КЛ) в гелиосфере принимаются во внимание процессы их диффузии, конвекции, дрейфа частиц и адиабатических потерь энергии. Направление дрейфов частиц зависит от знака их заряда. Анализ временных зависимостей потока космических лучей (протонов и ядер) и галактических электронов показывает, что, несмотря на различие их электрических зарядов, временные зависимости этих частиц подобны. Для объяснения этого подобия выдвинута гипотеза, что в отрицательные фазы 22-летнего солнечного магнитного цикла имеет место пересоединение магнитных силовых линий гелиосферы и магнитного поля Галактики. В положительные фазы между этими полями такое пересоединение отсутствует и создается магнитный барьер.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Экспериментальные данные, обсуждаемые ниже, были получены методом регулярного зондирования КЛ в атмосфере сотрудниками ФИАН. Большая помощь в проведении этих работ была оказана и оказывается в настоящее время Арктическим и Антарктическим НИИ Росгидромета (г. Санкт-Петербург) и Полярным геофизическим институтом РАН (г. Апатиты Мурманской области). Поток КЛ зависят от уровня солнечной активности

в 11-летнем солнечном цикле, а также зависят от фазы 22-х летнего солнечного магнитного цикла. Фаза 22-летнего солнечного магнитного поля определяется величиной A , которая обозначает направление полярного магнитного поля Солнца: при $A > 0$ – магнитные силовые линии выходят из северной полярной шапки Солнца и входят в южную; при $A < 0$ – картина меняется на противоположную. Рис. 1а показывает временные зависимости среднемесячных значений потоков КЛ в максимуме кривой их поглощения N_{max} в атмосфере полярных и средних широт с середины 1957 г. по настоящее время. Из рис. 1а видно, что во временном ходе потока КЛ имеется несколько особенностей. В отрицательные фазы солнечного магнитного цикла ($A < 0$) временной ход потока КЛ имеет пикообразную форму, а в положительные фазы ($A > 0$) – плоскую вершину. Другая особенность состоит в том, что в 2009 г. и в настоящее время (2019–2020 гг.) значения N_{max} превосходят величины потоков КЛ, полученных в предыдущих минимумах солнечной активности. Эти особенности подтверждаются данными нейтронных мониторов, например, данными нейтронных мониторов ИЗМИРАН (жесткость геомагнитного обреза $R_c = 2.4$ ГВ) и ПГИ ($R_c = 0.6$ ГВ) [1, 2].

Из рис. 1а видно, что увеличение темпа счета в атмосфере в 2009 г. и в 2020 г. составило ~10% по сравнению с максимальной скоростью счета в 1965 г. В то время как нейтронные мониторы уве-

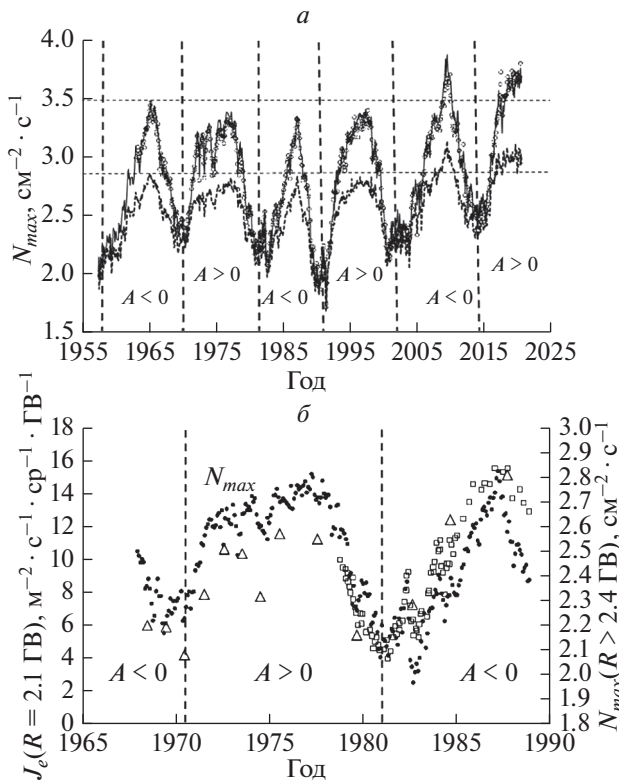


Рис. 1. Среднемесячные значения потоков КЛ в атмосфере в максимуме Регенера–Пфотцера, N_{max} , зарегистрированные в северных полярных широтах (тонкая кривая, геомагнитная жесткость обрезания $R_c = 0.6$ ГВ), в Антарктиде на станции Мирный (открытые кружки, $R_c = 0.04$ ГВ) и на северных средних широтах (нижняя пунктирная кривая, $R_c = 2.4$ ГВ). $A > 0$ — положительная фаза 22-летнего солнечного магнитного цикла; $A < 0$ — отрицательная фаза. Вертикальные пунктирные линии — примерные периоды переполюсования солнечного магнитного поля. Горизонтальные штриховые линии — максимальное значение N_{max} , которое наблюдалось в мае 1965 г. (а) Временной ход потока КЛ в 1968–1990 гг. по данным измерений в атмосфере N_{max} , полученный на широте с $R_c = 2.4$ ГВ (точки, правая вертикальная ось), и потока галактических электронов за тот же период J_e (левая вертикальная ось: треугольники — измерения на баллонах, квадраты — измерения на спутнике) [9] (б).

личили скорость счета на ~ 1 –2%. Большие потоки КЛ, наблюдаемые в минимумах солнечной активности 2009 и 2020 гг. по сравнению с предыдущими минимумами, вызваны аномально низкой солнечной активностью в 23 и 24 солнечных циклах.

Общепризнанным физическим механизмом, который объясняет разные формы кривых в положительные ($A > 0$) и отрицательные ($A < 0$) фазы 22-летнего солнечного магнитного цикла (рис. 1а), является дрейфовый механизм. Суть его заключается в том, что во время положительной фазы солнечного магнитного цикла, положительно заряженные частицы, распространяясь в квазирегулярном магнитном поле гелиосферы, дрейфуют

из области высоких гелиоширот к нейтральному слою. В периоды отрицательной фазы их дрейф идет от плоскости нейтрального токового слоя к высоким гелиоширотам. Для отрицательно заряженных частиц направление дрейфа меняется на противоположное, соответственно, должны поменяться местами пикообразная и плоская формы: при $A < 0$ будем иметь плоскую вершину, а при $A > 0$ будем иметь острую вершину.

СРАВНЕНИЕ ВРЕМЕННОГО ХОДА ПОЛОЖИТЕЛЬНО И ОТРИЦАТЕЛЬНО ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ КЛ

Потоки электронов в космических лучах составляют 1% или менее от общего числа частиц, падающих на установку. Поэтому их выделение из общего потока частиц представляет определенные трудности и требует использования строгих критериев отбора. В настоящее время имеется несколько долговременных рядов данных по электронам в КЛ: данные магнитных спектрометров ПАМЕЛА и AMS-02, данные калориметров CALET и DAMPE [3–8]. Более ранние данные об электронах в КЛ, полученные на баллонах и на спутнике, приведены в [9]. На рис. 1б в увеличенном масштабе показан временной ход потока электронов из [9] и данные по КЛ (положительно заряженные частицы), полученные по измерениям в атмосфере. Эти данные по электронам и КЛ (положительно заряженные частицы) относятся к периоду с 1968 по 1990 г. Из этого рисунка видно, что временные изменения потоков этих частиц происходят в фазе друг с другом. Это противоречит дрейфовому механизму, согласно которому формы кривых для отрицательно и положительно заряженных частиц должны быть различными: когда наблюдается плато для положительно заряженных частиц, должна наблюдаться пикообразная форма для отрицательно заряженных частиц и, наоборот, когда наблюдается плато для отрицательно заряженных частиц, должна наблюдаться пикообразная форма для положительно заряженных частиц.

Экспериментальные данные, приведенные на рис. 1б, показывают практически одинаковый временной ход для частиц разного знака. Это не означает, что в гелиосфере отсутствуют дрейфы. Скорее всего, в гелиосфере существует дополнительный механизм модуляции КЛ наряду с диффузией, конфекцией и дрейфами.

ВОЗМОЖНОЕ ОБЪЯСНЕНИЕ ОБСУЖДАЕМОГО ЭФФЕКТА

Из данных рис. 1б следует, что временные зависимости потока КЛ не зависят от знака заряда частиц, т.е. одинаковы для положительно и отрицательно заряженных частиц, хотя направление их скоростей дрейфа зависит от знака заряда. Для объ-

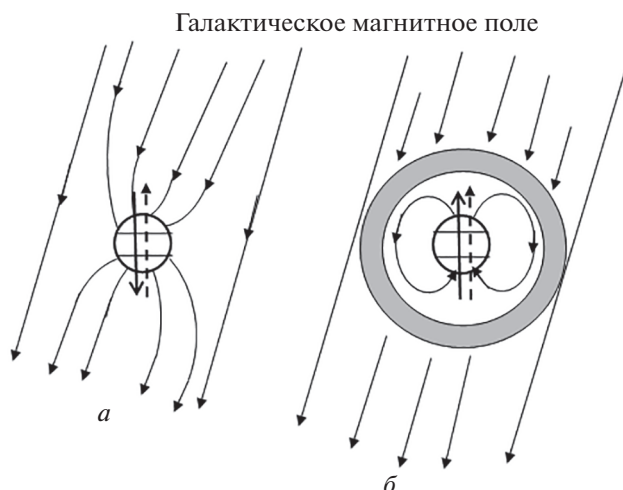


Рис. 2. Схематический вид гелиосферы в галактическом магнитном поле в отрицательные и положительные фазы 22-летнего солнечного магнитного цикла: отрицательная фаза, $A < 0$ – “открытая” гелиосфера (а); положительная фаза, $A > 0$ – “закрытая” гелиосфера (б). В центре находится Солнце, пунктирной стрелкой показана ось его вращения, сплошной стрелка – ось солнечного магнитного диполя. Серое кольцо – магнитный барьер.

яснения наблюдаемого эффекта мы предполагаем, что магнитное поле гелиосферы взаимодействует с галактическим магнитным полем [10, 11]. При отрицательной полярности общего магнитного поля Солнца ($A < 0$) происходит пересоединение магнитных силовых линий солнечного и галактического магнитных полей и мы имеем “открытую” гелиосферу. После инверсии (переполюсования) магнитного поля на Солнце ($A > 0$), гелиосфера становится “закрытой”. Эти два возможных состояния гелиосферы схематически показаны на рис. 2а, 2б. Когда гелиосфера “закрыта”, то на расстоянии более 100 а. е. образуется магнитный барьер толщиной в несколько десятков а. е. Этот барьер создает дополнительную модуляцию КЛ и ответственен за платообразные участки в зависи-

мости потока КЛ от времени в положительные фазы 22-летнего солнечного магнитного цикла.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученный результат предполагает, что механизм модуляции КЛ в гелиосфере должен принимать во внимание диффузию частиц через магнитный барьер на границе области модуляции в период существования закрытой гелиосферы ($A > 0$) или $\vec{M} \uparrow \uparrow \vec{\Omega}$, где \vec{M} есть магнитный момент Солнца, $\vec{\Omega}$ – ось вращения Солнца).

Выше упоминалось, что выделение электронов из общего потока частиц, падающих на прибор, представляет определенные трудности. В настоящее время имеются данные о потоках галактических электронов, полученные на спутниках за достаточно длительные промежутки времени [3–7]. Предварительные результаты анализа этих данных подтверждают гипотезу о “закрытой” и “открытой” гелиосфере.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <http://cr0.izmiran.ru/mosc>.
2. <http://pgia.ru/data/nm>.
3. *Mikhailov V.V., Adriani O., Barbarino G. et al.* // J. Phys. Conf. Ser. 2019. V. 1390. Art. No. 012061.
4. *Potgieter M.S., Vos E.E., Munini R. et al.* // Astrophys. J. 2015. V. 810. P. 141.
5. *Aguilar M., Cavazonza L., Ambrosi G. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2018. V. 121. Art. No. 051102.
6. *Adriani O., Akaike Y., Asano K.* // Phys. Rev. Lett. 2017. V. 119. Art. No. 181101.
7. *Bernardini P. on behalf of the DAMPE Collaboration* // EPJ Web Conf. 2019. V. 209. Art. No. 01048.
8. <http://tools.ssdc.asi.it/CosmicRays>.
9. *Tuska E.B.* Charge-sign dependent solar modulation of 1–10 GV cosmic rays. PhD dissertation. University of Delaware, 1990.
10. *Nagashima K.* // Proc. 15th ICRC. V. 10. (Plovdiv, 1977). P. 380.
11. *Крымский Г.Ф.* // Геомагн. и аэроном. 1981. Т. 21. С. 923.

Cosmic ray modulation effects in the period of the low solar activity

Y. I. Stozhkov^{a, b, *}, V. S. Makhmutov^{a, b}, G. A. Bazilevskaya^a, N. S. Svirzhevsky^a,
A. K. Svirzhevskaya^a, M. V. Philippov^a

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

^bMoscow Physical-Technical Institute, Dolgoprudny, 141700 Russia

*e-mail: stozhkovyi@lebedev.ru

The long-term cosmic ray modulation in positive and negative phases of the 22-year solar magnetic cycle is discussed including the anomaly low solar activity in 2008–2020. In the negative phases the reconnection of solar magnetic field lines with galactic ones takes place. In the positive phases a magnetic barrier exists between solar and galactic magnetic fields and it is necessary to take into account this phenomenon when cosmic ray modulation is considered.