Письма в ЖЭТФ, том 98, вып. 12, с. 867 – 870

Вариации интенсивности космических лучей в 11-летнем цикле солнечной активности: эксперимент и теория

Г. Ф. Крымский, П. Ю. Гололобов, П. А. Кривошапкин, С. К. Герасимова, В. Г. Григорьев, С. А. Стародубцев[1)]

Институт космофизических исследований и аэрономии им. Шафера СО РАН, 677980 Якутск, Россия

Поступила в редакцию 29 октября 2013 г.

После переработки 25 ноября 2013 г.

Для изучения долговременных вариаций интенсивности космических лучей в широкой области энергий используется разработанная в ИКФИА СО РАН базовая модель модуляции космических лучей в гелиосфере. Модель имеет только один свободный параметр модуляции – отношение регулярного магнитного поля к турбулентному. Она может применяться для описания вариаций интенсивности космических лучей в широкой области энергий (от 100 МэВ до 100 ГэВ). В данной работе предпринята попытка наиболее корректно с физической точки зрения описать особенности поведения интенсивности космических лучей за несколько циклов солнечной активности.

DOI: 10.7868/S0370274X13240016

1. Введение. Цикл солнечной активности (СА) в вариациях интенсивности космических лучей (КЛ) отражает изменение условий их распространения в гелиосфере. С солнечным циклом связаны напряженности межпланетного магнитного поля (ММП), скорость солнечного ветра, геометрия областей быстрого и медленного солнечного ветра, структура токового слоя и его “гофр”, обнаруживающий себя как секторная структура магнитного поля, а также другие параметры.

Современные модели модуляции галактических КЛ в гелиосфере дают правильное и достаточно детальное описание наблюдаемых процессов, учитывающее изменение всех перечисленных параметров в разном сочетании. В качестве примера можно упомянуть работы [1–3] и содержащиеся там ссылки на литературу.

Теория, описываемая в этих и других работах, опирается на представление о диффузии КЛ, их конвекции вместе с солнечным ветром и магнитным дрейфом.

Детальное описание требует расчета трехмерных моделей с помощью численных методов. Такие программы созданы упомянутыми авторами. Кота и Джокипи [1] исследовали распределение космических лучей по гелиодолготе, гелиошироте и по расстоянию от Солнца, а также деформацию их энергетического спектра. Поджиетер и соавторы [2, 3] изучили влияние гелиоширотной асимметрии на КЛ при обеих полярностях общего магнитного поля Солнца, а также их модуляцию, зависящую от времени.

Достоинство всех упомянутых работ состоит в том, что в них приняты во внимание многочисленные факторы, изменяющиеся с солнечным циклом, и соответственно описываются те или иные детали модуляции. Однако детализация может восприниматься и как недостаток: в подобных расчетах трудно уловить главный фактор и проследить доминирующий процесс модуляции.

Возможна противоположная постановка задачи: освобождение модели гелиосферы от излишних деталей, ее максимальное упрощение и выделение в ней единственного фактора, меняющегося с солнечным циклом.

В настоящей работе авторами обсуждаются результаты расчетов именно в такой постановке.

2. Модель гелиосферы и солнечный цикл. Модельная гелиосфера представляет собой область, ограниченную радиусом ≈ 100 астрономических единиц, за пределами которой наблюдается неизменная интенсивность КЛ, такая же, как в межзвездной среде. Величина радиуса весьма слабо влияет на получаемые результаты. Гелиосфера заполнена однородным радиальным солнечным ветром со скоростью $400\,\text{км}\cdot\text{с}^{-1}$, не меняющимся с солнечным циклом. Радиальная составляющая регулярного магнитного поля не зависит от гелиошироты по величине и имеет противоположные знаки в северной и южной полусферах. Токовый слой, разделяющий полусферы, расположен в плоскости солнечного экватора и не имеет гофра. Геометрия регулярного поля полностью

[1)] e-mail: starodub@ikfia.sbras.ru

определяется кинематикой, сочетающей солнечный ветер с твердотельным вращением Солнца. На регулярное поле наложено турбулентное. Отношение напряженностей этих двух полей одинаково во всей гелиосфере, но меняется с циклом. Турбулентное поле в течение 4.5 лет линейно растет со временем от минимума СА, где оно составляет малую долю от регулярного, до максимума, когда регулярное поле становится исчезающе малым. Затем оно линейно падает в течение 6.5 лет. Суммарное поле не меняется с циклом СА. Отметим, что, строго говоря, это не так, но изменения суммарного поля много меньше изменений каждого из двух полей в отдельности. Знак регулярной составляющей меняется в момент максимума.

3. Механизм переноса космических лучей. В данном случае используется стандартное уравнение переноса [4, 5], в котором тензор диффузии в каждой точке гелиосферы определяется гирочастотой частиц в регулярном поле ω и временем их рассеяния в турбулентном поле τ. Параметр $\kappa = \omega\tau$ одинаков для всей гелиосферы, но меняется с солнечным циклом. Антисимметричная часть тензора описывает магнитный дрейф частиц. Критически важным является изменение скорости дрейфа: с ростом СА она падает, а в момент максимума полностью исчезает.

Уравнение переноса для частиц высоких энергий линейно по изменяющемуся параметру, а для частиц меньших энергий – по логарифму интенсивности.

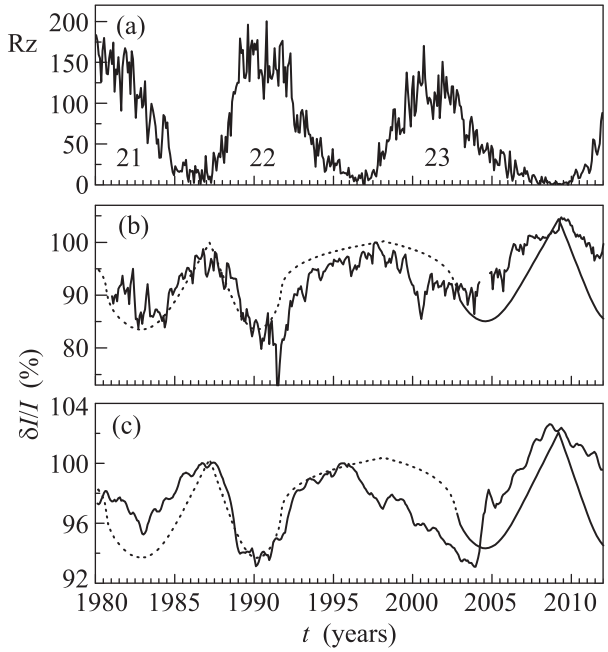
Задача в описанной постановке была названа базовой моделью. Она имеет приближенное аналитическое решение как для частиц высоких энергий [6] (наземные наблюдения), так и для частиц меньших энергий [7] (стратосферные наблюдения).

4. Сравнение с результатами наблюдений. Непрерывные измерения интенсивности КЛ проводятся уже почти 60 лет. Наиболее мощная вариация интенсивности КЛ обусловлена проявлением 11-летней СА. По данным наземных наблюдений глубина модуляции интенсивности КЛ в 11-летнем цикле достигает 20−25% относительно минимума СА. В стратосфере и в космическом пространстве она значительно больше. Временные изменения интенсивности КЛ в 11-летних циклах СА характеризуются сменой ее максимумов с острыми и плоскими вершинами. Наблюдения показывают, что в течение 19–22 циклов СА максимумы интенсивности КЛ имеют практически одинаковые значения, независимо от формы ее вершин. В работе [6] показано, что 22-летний цикл, наблюдаемый в нейтронной компоненте КЛ, вполне удовлетворительно описывается нашей моделью как по величине вариаций, так и по форме временной зависимости. Сравнение модельных расчетов [7] с результатами наблюдений КЛ в высокоширотной и среднеширотной стратосфере также показывает общее согласие. Во всех случаях, рассмотренных в [6, 7], остаточная величина параметра κ в период солнечного минимума была одинаковой: $k_0 = 5$. Таким образом, используемая модель дает удовлетворительное описание КЛ с энергиями от сотни МэВ до десятков ГэВ. Отметим, что единое значение k_0 для различных диапазонов энергий указывает на неизменную форму спектра магнитной турбулентности солнечного ветра, которая в модели постулирована как степенная с показателем −1. Это находится в кажущемся противоречии с прямыми измерениями спектров флуктуаций ММП [8]. Однако следует принимать во внимание, что КЛ отражают характер турбулентности во всем объеме гелиосферы, которая, естественно, отличается от турбулентности вблизи орбиты Земли. Удовлетворительное описание модуляции нашей моделью в течение длительного интервала нарушается в 23-м цикле. Между 23-м и 24-м циклами наблюдалось значительное превышение потоков КЛ над всеми предыдущими максимумами. В зависимости от энергии КЛ это превышение составляет от единиц до десятков процентов [9].

В данной работе на основе измерений интенсивности КЛ высоких энергий ($E > 1$ ГэВ) с использованием базовой модели модуляции КЛ в гелиосфере предпринята попытка установить физические причины указанного превышения.

Мы рассматриваем период времени 1980–2012 гг., от максимума 21-го до начала 24-го циклов СА. В качестве индекса СА мы используем среднемесячные данные по числу солнечных пятен Rz (http://sidc.oma.be/sunspot-data), а также среднемесячные значения интенсивности КЛ, зарегистрированной в Якутске с помощью нейтронного монитора и вертикального мюонного телескопа, установленного на уровне 0 м водного эквивалента (в.э.). Эти приборы входят в состав Якутского спектрографа КЛ им. А.И. Кузьмина и характеризуются эффективными энергиями регистрации частиц 13 и 32.5 ГэВ соответственно. Подробные сведения о спектрографе КЛ приведены на сайте http://hecrlab.ysn.ru.

Результаты многолетних измерений интенсивности КЛ в Якутске представлены на рис. b и с. Из рисунка видно, что в течение длительного времени, максимумы интенсивности КЛ в различных солнечных циклах имели практически одинаковые значения. Но, в глубоком минимуме СА между 23-м и 24-м циклами, который наблюдался в 2008–2010 гг.



Временные зависимости числа солнечных пятен (a) и интенсивности КЛ, зарегистрированной в Якутске с помощью нейтронного монитора (b) и мюонного телескопа, установленного на уровне 0 м в.э. (c). Числа – номера солнечных циклов. Линии – модельные расчеты интенсивности КЛ для параметра $k_0 = 5$ (пунктир) и 15 (сплошная линия)

(рис. a), Якутским спектрографом было зарегистрировано необычное и значительное превышение интенсивности КЛ над всеми предыдущими максимумами. По данным нейтронного монитора это превышение составляет величину около 5%, а мюонного телескопа – около 3%. Эта картина хорошо согласуется с результатами измерений, выполненных на нейтронных мониторах и космических аппаратах другими авторами (см., например, [9] и ссылки в ней).

Попытки удовлетворительного описания поведения 11-летних вариаций интенсивности КЛ с помощью базовой модели модуляции для всего временного ряда данных наблюдений привели нас к выводу о том, что использование прежнего значения уровня остаточной турбулентности, одного для всех циклов СА [6], не представляется возможным. Это означает, что ситуация в солнечном ветре в прошедшем 23-м цикле могла значительно измениться по сравнению с предыдущими. Наши исследования вариаций интенсивности КЛ и флуктуаций ММП привели к следующим результатам по сравнению с предыдущими.

1. Исследования спектральных характеристик турбулентности солнечного ветра в 20–23-х циклах СА показали, что в 23-м цикле в области частот 2.2×10^{-6}–$1.4 \cdot 10^{-4}$ Гц, соответствующей энергетическому участку спектра, наблюдается пониженный уровень флуктуаций ММП. Это является прямым указанием на существование более регулярного ММП, чем в предыдущих циклах [8].

2. Результаты работ по изучению форбуш-эффектов показали, что в 23-м солнечном цикле наблюдались более жесткие спектры понижений КЛ, чем в 3 предыдущих [8]. Это позволяет утверждать, что в 23-м цикле в формировании понижений КЛ преобладала роль пробочного механизма, для эффективной работы которого также требуется наличие в межпланетной среде достаточно ламинарного магнитного поля [10].

Таким образом, имеются определенные основания для изменения значения свободного параметра модели k_0 в большую сторону.

Результат применения модели для различного уровня остаточной турбулентности показан на рис. a и b. Видно, что при значениях свободного параметра нашей модели $k_0 = 5$ (для периода времени от максимума 21-го до максимума 23-го циклов СА) и $k_0 = 15$ (от максимума 23-го до начала 24-го цикла) между экспериментом и теорией наблюдается удовлетворительное согласие.

Измерения интенсивности КЛ более низких энергий в стратосфере над Мурманском (геомагнитный порог обрезания $R_c = 0.6$ ГВ) и Москвой ($R_c = 2.4$ ГВ) в 19–23-м циклах СА показали, что в течение 4 циклов СА (с 19-го по 22-й) максимумы интенсивности КЛ имели практически одинаковые значения. Вместе с тем в глубоком минимуме СА 2008–2010 гг. было зарегистрировано необычное значительное превышение потока КЛ над всеми предыдущими максимумами. Оно составляет величину около 15% [9]. Применение нашей модели к данным стратосферных наблюдений также приводит к выводу о том, что вплоть до конца 22-го цикла СА долговременные вариации потока КЛ удовлетворительно описываются при тех же значениях $k_0 = 5$ параметра, характеризующего уровень остаточной турбулентности солнечного ветра. Однако с началом 23-го цикла это согласие резко нарушается. Расчеты показывают, что согласие между теорией и экспериментом в данном случае достигается при существенно большем значении свободного параметра, $k_0 = 15$ [7].

5. Заключение. Модель предсказывает появление минимума интенсивности в нечетном цикле СА (когда поле меняет знак полярности с "+" на "−") в более позднее время, чем максимума цикла. Это связано с возникновением магнитного дрейфа, который в данную эпоху препятствует проникновению КЛ к наблюдателю. Та же причина ведет к более раннему появлению следующего минимума интенсивности. С этим же обстоятельством связана острая форма пика КЛ в минимуме СА в эпоху отрицательной полярности. Все перечисленные особенности подтверждаются наблюдениями. Таким образом, базовая модель модуляции КЛ в гелиосфере [6, 7] удовлетворительно описывает результаты измерений интенсивности КЛ как в стратосфере, так и на Земле. Применимость предложенной модели позволяет утверждать, что именно уровень турбулентности при описании долговременных вариаций интенсивности КЛ является решающим фактором. Его уменьшение в 23-м цикле по отношению к предыдущим служит причиной наблюдаемого увеличения потока КЛ в прошедшем глубоком минимуме СА.

Авторы благодарят рецензента за ценные замечания. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты # 12-02-98506-р_восток_а, 12-02-98507-р_восток_а, 12-07-00227-а, 13-02-00989-а и 13-02-00585-а), а также программы президиума РАН # 10.

1. J. Kota and J. R. Jokipii, Astrophys. J. **265**, 573 (1983).
2. M.S. Potgieter, R.A. Burger, and S.E.S. Ferreira, Space Sci. Rev. **97**, 295 (2001).
3. R. Manuel, S.E.S. Ferreira, M.S. Potgieter, R.D. Strauss, and N.E. Engelbrecht, Adv. Space Res. **47**, 1529 (2011).
4. G.F. Krymsky, Geomag. and Aeron **4**, 763 (1964).
5. E.N. Parker, Planet Space Sci. **13**, 9 (1965).
6. G.F. Krymsky, P.A. Krivoshapkin, V.P. Mamrukova, and S.K. Gerasimova, JETP **104**, 189 (2007).
7. G.F. Krymsky, P.A. Krivoshapkin, S.K. Gerasimova, P.Yu. Gololobov, V.G. Grigor'ev, and S.A. Starodubtsev, Astron. Lett. **38**, 609 (2012).
8. S.A. Starodubtsev and V.G. Grigoryev, Geomag. and Aeron. **51**, 1004 (2011).
9. M.B. Krainev, G.A. Bazilevskaya, S.K. Gerasimova, P.A. Krivoshapkin, G.F. Krymsky, S.A. Starodubtsev, Yu.I. Stozhkov, and N.S. Svirzhevsky, J. Phys.: Conf. Ser. **409**, 012016 (2013).
10. Г.Ф. Крымский, А.И. Кузьмин, П.А. Кривошапкин, И.С. Самсонов, Г.В. Скрипин, И.А. Транский, Н.П. Чирков, *Космические лучи и солнечный ветер*, Новосибирск, Наука (1981), 224 с.