

Инжекция солнечных энергичных частиц в межпланетное пространство

33-я Всероссийская конференция по космическим лучам



И.С. Петухов, С.И. Петухов

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

Абстракт

Предполагаем, что СКЛ, регистрируемые в межпланетном пространстве, генерируются 2-мя разными источниками: 1) в нижней части атмосферы неизвестным механизмом ускорения во время солнечной вспышки и 2) в верхней части атмосферы ударной волной СМЕ. Исследуется инжекция СКЛ от 1-го из перечисленных источников в межпланетное пространство. Солнечная атмосфера представлена в виде сферической оболочки с заданными толщиной и уровнем турбулентности магнитного поля. Временная и угловая зависимости потока инжектируемых частиц определены из решения уравнения диффузии частиц для сосредоточенного в пространстве и импульсного во времени источника. С учетом распространения частиц в межпланетном пространстве (Модель Кримиписа для высокоэнергичных частиц) модель воспроизводит: 1) образование быстрой и диффузной компонент СКЛ; 2) сильно неоднородное угловое распределение потока СКЛ на орбите Земли; 3) немонотонное поведение и экспоненциальный спад во времени потока СКЛ в межпланетном пространстве; 4) соотношение между потоками СКЛ на высоких широтах и в экваториальной плоскости. Модель естественным образом объясняет возможность длительного пребывания СКЛ в солнечной атмосфере, установленное из регистрации гамма-излучения в некоторых вспышках.

Введение

Из анализа большого количества событий СКЛ за период 1997-2006 гг. (всего 280 событий) следует, что существенную часть потоков СКЛ в межпланетном пространстве составляют вспыхивающие частицы (Cane et al., JGR, 2010). Свойства потоков вспыхивающих СКЛ, в основном, формируются при их распространении через атмосферу Солнца. Мы рассчитали свойства потоков СКЛ в межпланетном пространстве на разных геоширотах при учете их распространения через солнечную атмосферу. В модели атмосферу Солнца представляем сферический слой, ограниченный радиусами r_{max} и r_{min} . СКЛ в начальный момент времени задаем как источник импульсный во времени и сосредоточенный в пространстве. Полагаем, что распространение частиц происходит посредством их пространственной диффузии. В сферической системе координат, полярная ось которой проходит через источник, решение осесимметрично

$$J_l(\epsilon, t) = -\frac{F_g}{4\pi r_s^2 t_s} \sum_0^\infty (2n+1) P_n(\cos\theta) e^{-n(n+1)t/t_s} \frac{\partial \psi_n}{\partial r} \Big|_{r=r_{min}}^{r=r_{max}}$$

$$= \tau_s^2/k_s \dots$$

где $\tau_s = r_s^2/k_s$ — масштаб времени, r_s — радиус Солнца, k_s — коэффициент диффузии частиц в солнечной атмосфере; F_g — спектр частиц в источнике; P_n — полиномы Лежандра; ψ_n — набор функций для каждого полинома Лежандра. Интенсивность СКЛ в зависимости от времени в выбранной точке описывается моделью Кримиписа в случае коэффициента диффузии $k=k_*(r/r_s)^\beta$, $0 < \beta < 1$ с учетом рассчитанного потока инжектируемых частиц

$$J(r, \epsilon, t) = \frac{F_g r_{max}^2}{(4\pi r_s^2 r_s^2 I_s^2)} \left(\frac{t}{t_s}\right)^{3/(2-\beta)} \int_0^t J_l(\epsilon, \tau) (t-\tau)^{-3/(2-\beta)} \times \exp\left(\frac{-r_*^{2-\beta}(t_s/t_s)}{(2-\beta)^2(t-\tau)}\right) d\tau$$

где $t_* = r_s^2/k_*$ — масштаб времени; $r_* = r/r_s$;

$$I = 2(2-\beta)^{\frac{4+\beta}{2-\beta}} \int_0^\infty x^{\frac{4+\beta}{2-\beta}} e^{-x^2} dx \text{ - нормировка.}$$

Модельные расчеты сопоставлены с измерениями потоков СКЛ на космических аппаратах GOES и Ulysses, приведенными в статье (Struminsky et al., Adv. In Space Res., 2006). Параметры событий приведены в таблице 1. Радиус точки инжекции частиц является свободным параметром. На рис. 1 приведена зависимость интенсивности частиц от радиуса точки инжекции. Зависимость интенсивности частиц от координат космических аппаратов для параметров 1-го события представлен на рис. 2.

Таблица 1.

| No | Дата | Начало вспышки | Координаты вспышки | Дистанция до Ulysses (а.е.) | Широта Ulysses | Долгота Ulysses |
|----|------------------|----------------|--------------------|-----------------------------|----------------|-----------------|
| 1 | 14 Июля 2000 | 10:03 | N22W07 | 3.2 | 62S | E116 |
| 2 | 12 Сентября 2000 | 11:31 | S12W18 | 2.7 | 71S | E162 |
| 3 | 08 Ноября 2000 | 22:42 | N10W77 | 2.4 | 80S | E182 |
| 4 | 24 Сентября 2001 | 09:32 | S18E27 | 1.8 | 72N | W31 |
| 5 | 04 Ноября 2001 | 16:03 | N06W18 | 2.1 | 78N | W63 |
| 6 | 22 Ноября 2001 | 20:18 | S25W67 | 2.31 | 74N | W60 |
| 7 | 26 Декабря 2001 | 04:32 | N08W54 | 2.5 | 67N | W39 |

Одно из событий (15 августа 2001 года) было исключено, так как для него нет координат вспышки.

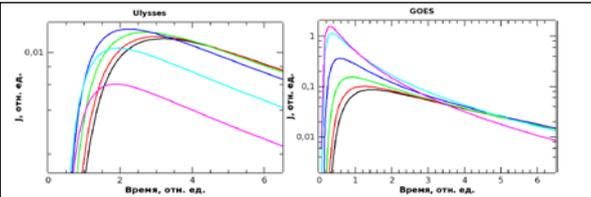


Рисунок 1. Зависимость потока интенсивности СКЛ от радиуса точки инжекции в атмосфере Солнца. Черная линия радиус - 1.3 Rs, красная - 1.5 Rs, зеленая - 1.8 Rs, синяя - 2.2 Rs, голубая - 2.6 Rs, розовая - 2.8 Rs.

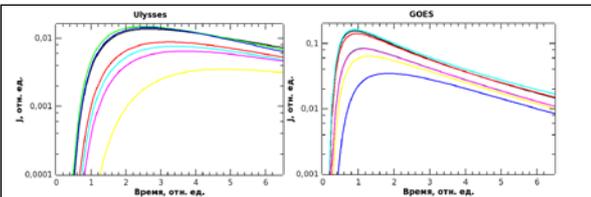


Рисунок 2. Потоки интенсивности СКЛ для координат соответствующих положению спутников GOES и Ulysses для 7 выбранных событий при одинаковых остальных параметрах.

Сопоставление расчетов интенсивности частиц в 7-ми событиях с измерениями на космических аппаратах GOES и Ulysses приведено на рис.3.

Использованные в расчетах параметры приведены в Таблице 2. Значения модельных параметров выбраны из лучшего соответствия между расчетом и измерениями на космическом аппарате Ulysses.

Таблица 2.

| No | Дата | Радиус точки инжекции | Коеф. дифф. в атмосфере, *10 ¹⁷ (17) см ² /с | Коеф. дифф. в пространстве, *10 ¹⁷ (22) см ² /с | Количество инжектированных частиц *10 ³³ (33) | β |
|----|------------------|-----------------------|--|---|--|---|
| 1 | 14 Июля 2000 | 2.8 | 0.143 | 0.143 | 160 | 0 |
| 2 | 12 Сентября 2000 | 1.7 | 0.125 | 0.125 | 25 | 0 |
| 3 | 08 Ноября 2000 | 2.4 | 0.157 | 0.357 | 27 | 0 |
| 4 | 24 Сентября 2001 | 2.9 | 0.6 | 0.4 | 34 | 0 |
| 5 | 04 Ноября 2001 | 2.8 | 0.0083 | 0.0016 | 2.1 | 0 |
| 6 | 22 Ноября 2001 | 2.4 | 0.3 | 0.2 | 33 | 1 |
| 7 | 26 Декабря 2001 | 1.8 | 0.143 | 0.143 | 6.2 | 0 |

Мы полагаем, что инжекция частиц на высоких широтах в реальной атмосфере лучше соответствует использованной однородной модели. В тоже время инжекция частиц в области солнечного экватора может отличаться от модельной из-за присутствия областей с сильным магнитным полем.

Как видно из сопоставления расчет удовлетворительно воспроизводит измерения интенсивности СКЛ. Превышение рассчитанной интенсивности над измеренной GOES во 2-ом, 6-м и 7-м событиях может быть обусловлено угловой неоднородностью интенсивности СКЛ, часто наблюдаемой на орбите Земли.

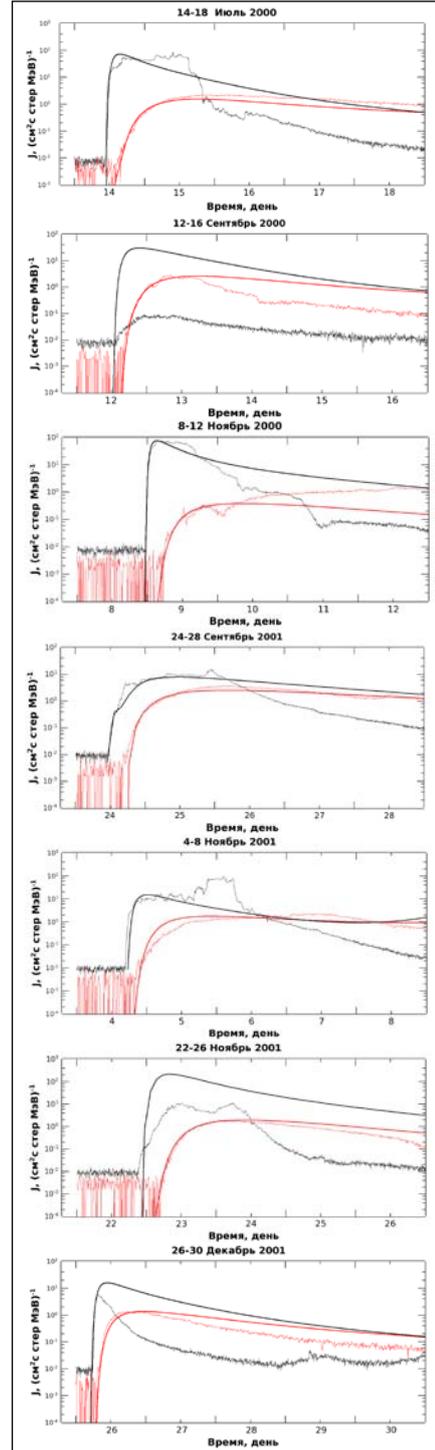


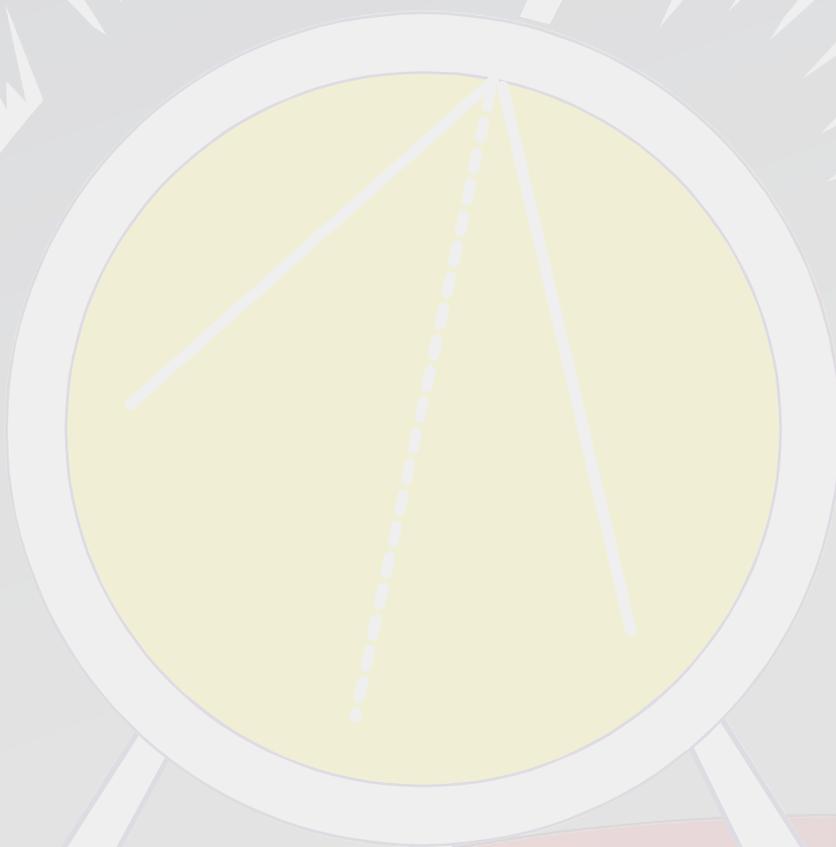
Рисунок 3. Сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными полученными на спутниках GOES и Ulysses для 7 выбранных событий. Красные линии соответствуют спутнику Ulysses, черные — GOES. Толстые линии представляют результаты расчета, тонкие — экспериментальные данные.

Заключение

Предполагается, что СКЛ зарегистрированные одновременно космическими аппаратами GOES и Ulysses, являются вспыхивающими. Предложена модель инжекции СКЛ из солнечной атмосферы в межпланетное пространство. Сопоставление результатов расчета и измерений показывает удовлетворительное согласие.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта
«Научно-образовательного фонда поддержки молодых
ученых Республики Саха (Якутия) № 2014-01-0018

ЯКУТСК



ИЖФОНА