

Формирование функции инъекции релятивистских солнечных космических лучей в межпланетное пространство

Петухов И.С., Петухова А.С., Петухов С.И.

ИКФИА СО РАН, г. Якутск, petukhov@ikfia.ysn.ru

37 Всероссийская конференция по космическим лучам
(Москва, 27.06 – 1.07.2022)

Формирование характеристик солнечных космических лучей (СКЛ) в постепенных событиях, наблюдаемых в межпланетном пространстве, происходит в 2 стадии:

1 стадия — ускорение частиц тепловой плазмы солнечной атмосферы ударной волной, сопровождающей КВМ вблизи Солнца;

2 стадия — распространение СКЛ в межпланетном пространстве.

Переход СКЛ из первой стадии во вторую описывается функцией инжекции: поток из солнечной атмосферы в межпланетное пространство в зависимости от энергии и времени.

Функция инжекции релятивистских СКЛ сохраняет детали процесса ускорения, поскольку они убегают от КВМ в межпланетном пространстве, распространяясь по невозмущенному солнечному ветру.

Характеристики релятивистских СКЛ в событии 15.04.2001 (Пасха, GLE 60) экспериментально определили Бибер и др. (ApJL, 2004).

Согласно найденной величине длины свободного пробега коэффициент диффузии СКЛ в межпланетном пространстве

$$k_{МП} = 2.5 \cdot 10^{22} \text{ см}^2 / \text{с}$$

Из модельных расчетов ускорения частиц в солнечной атмосфере диффузионным механизмом следует, что для появления в спектре СКЛ с энергией ~ 1 ГэВ необходимо

$$k_{c_a}(1 \text{ ГэВ}) < 10^{19} \text{ см}^2 / \text{с}$$

Из сопоставления величин следует, что коэффициенты диффузии частиц в солнечной атмосфере и межпланетном пространстве значительно различаются. Кроме того, из вида функции инжекции релятивистских СКЛ — излом во временной зависимости при максимальной величине — следует, что переход между значениями коэффициента диффузии происходит на небольшом пространственном интервале. В модельном расчете полагаем, что длина интервала перехода равна нулю.

При расчете характеристик СКЛ в 1-й стадии формирования использована модель, изложенная в статье Петухова и др. (ApJ, 2017).

В расчете принято:

Коэффициент диффузии в
солнечной атмосфере

$$k = k_0 (p/m_p c)^{1/3} \cdot (r/R_c)^{0.2}$$

$$k_0 = 6.0 \cdot 10^{17} \text{ см}^2/\text{с}$$

Радиус поглощающей границы

$$r_1 = 6 R_c$$

Импульс инжектированных протонов

$$p_{inj} = 3 m_p c_{s,2}$$

Доля инжектированных протонов

$$N_{inj} = 10^{-5} N$$

Коэффициент диффузии в межпланетном
пространстве

$$k_e = 1.4 \cdot 10^{22} \text{ см}^2/\text{с}$$

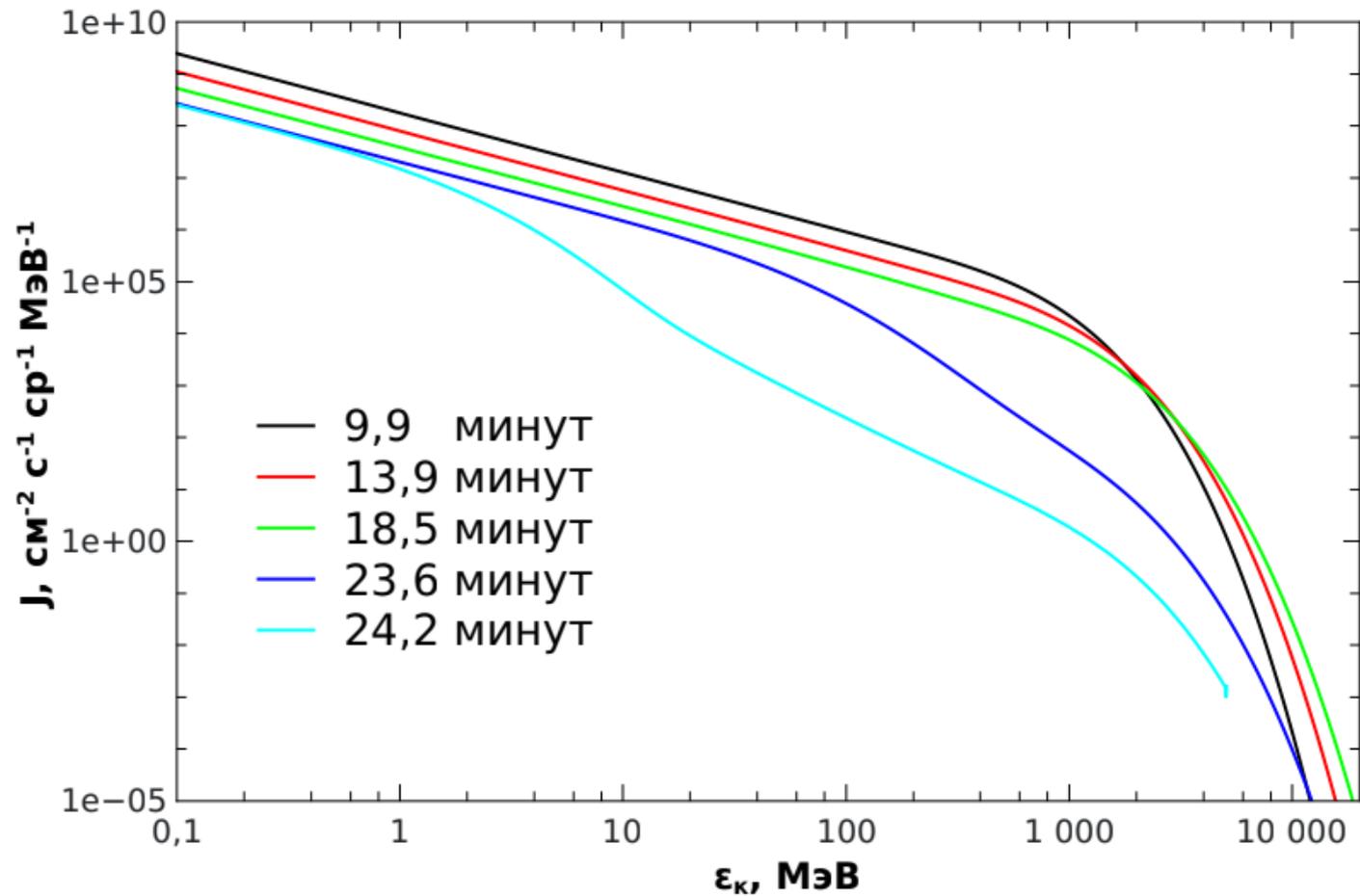


Рисунок 1. Интенсивность СЭЭ на ударном фронте в зависимости от энергии для 5-ти моментов времени.

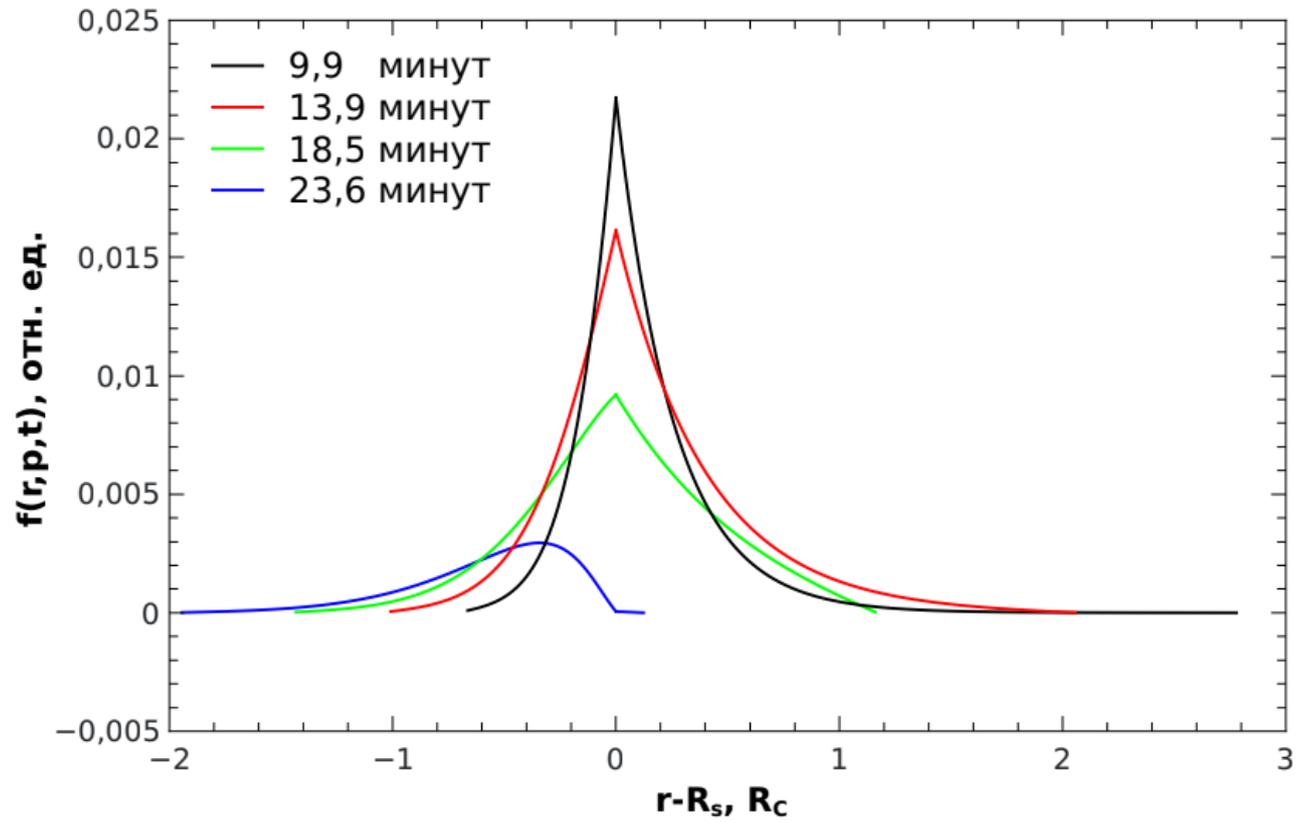


Рисунок 2. Пространственное распределение СКЛ с энергией 1 ГэВ для 4-х моментов времени.

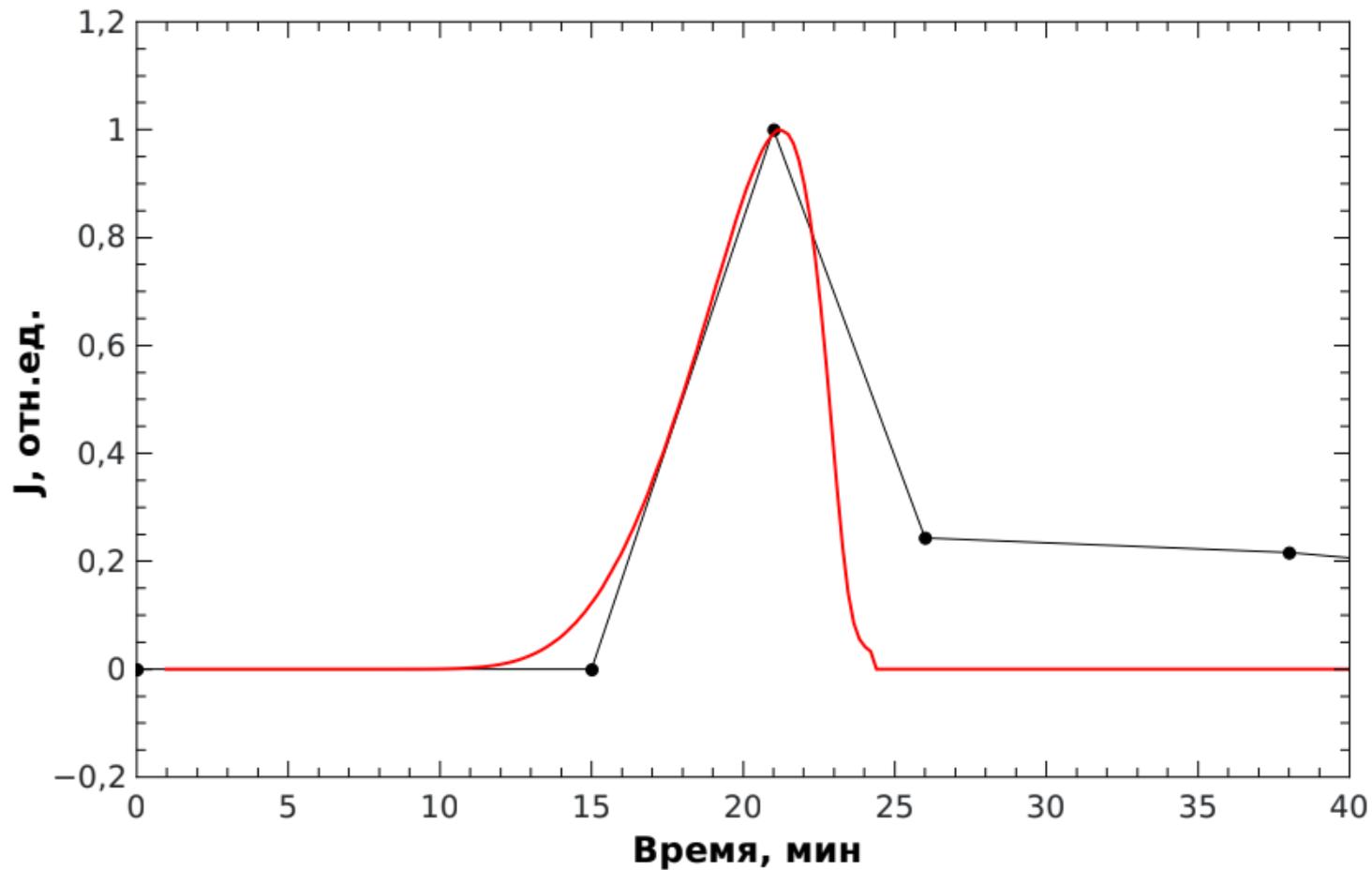


Рисунок 3. Функция инжекции СКЛ с энергией 1 ГэВ в зависимости от времени. Черная кривая — на основе наблюдений (Бибер и др., АрЛ, 2004), красная — расчет.

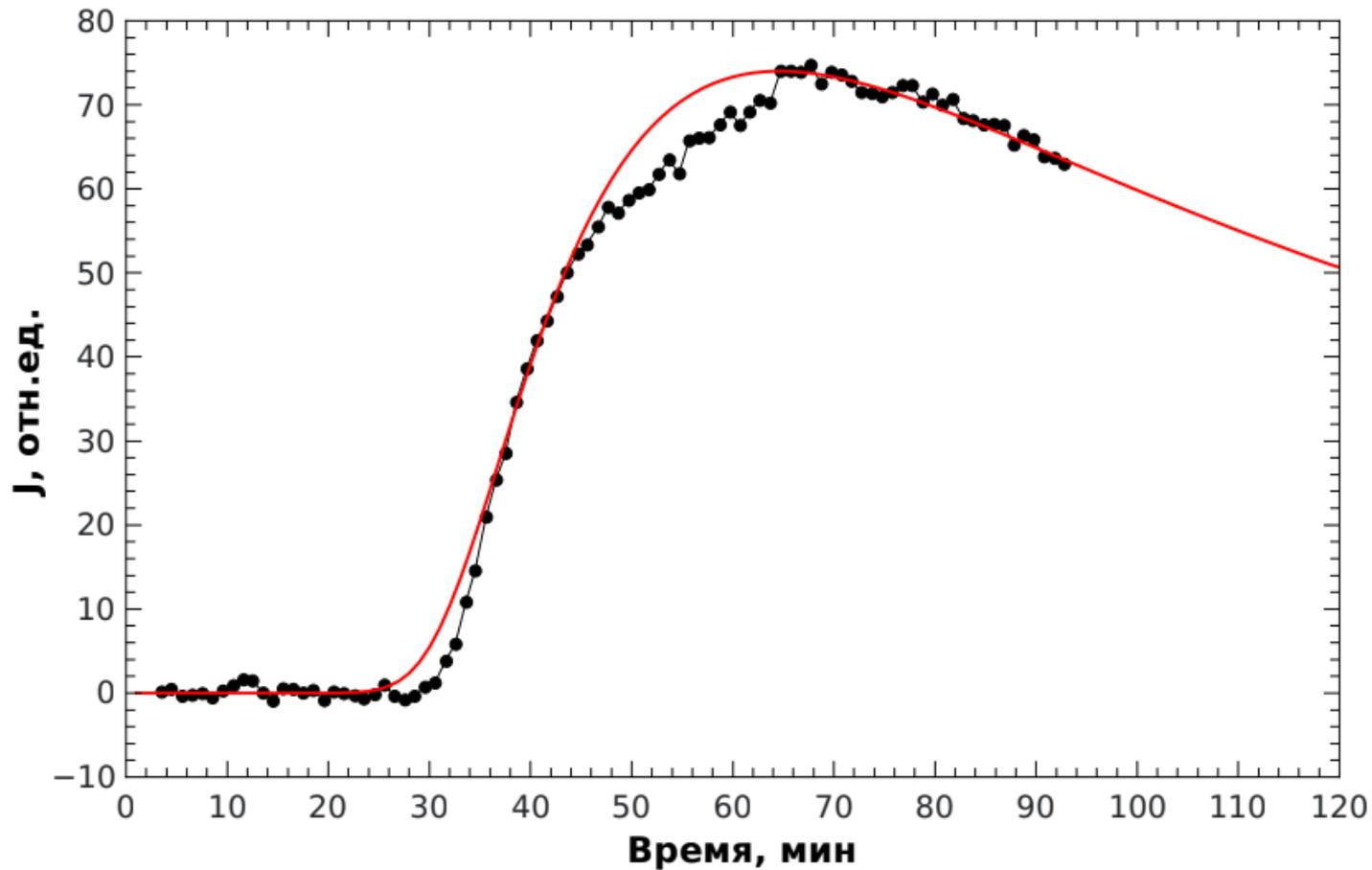


Рисунок 4. Интенсивность СКЛ с энергией 1 ГэВ на орбите Земли в зависимости от времени. Черная кривая — наблюдения (Бибер и др., ApJ, 2004), красная — расчет.

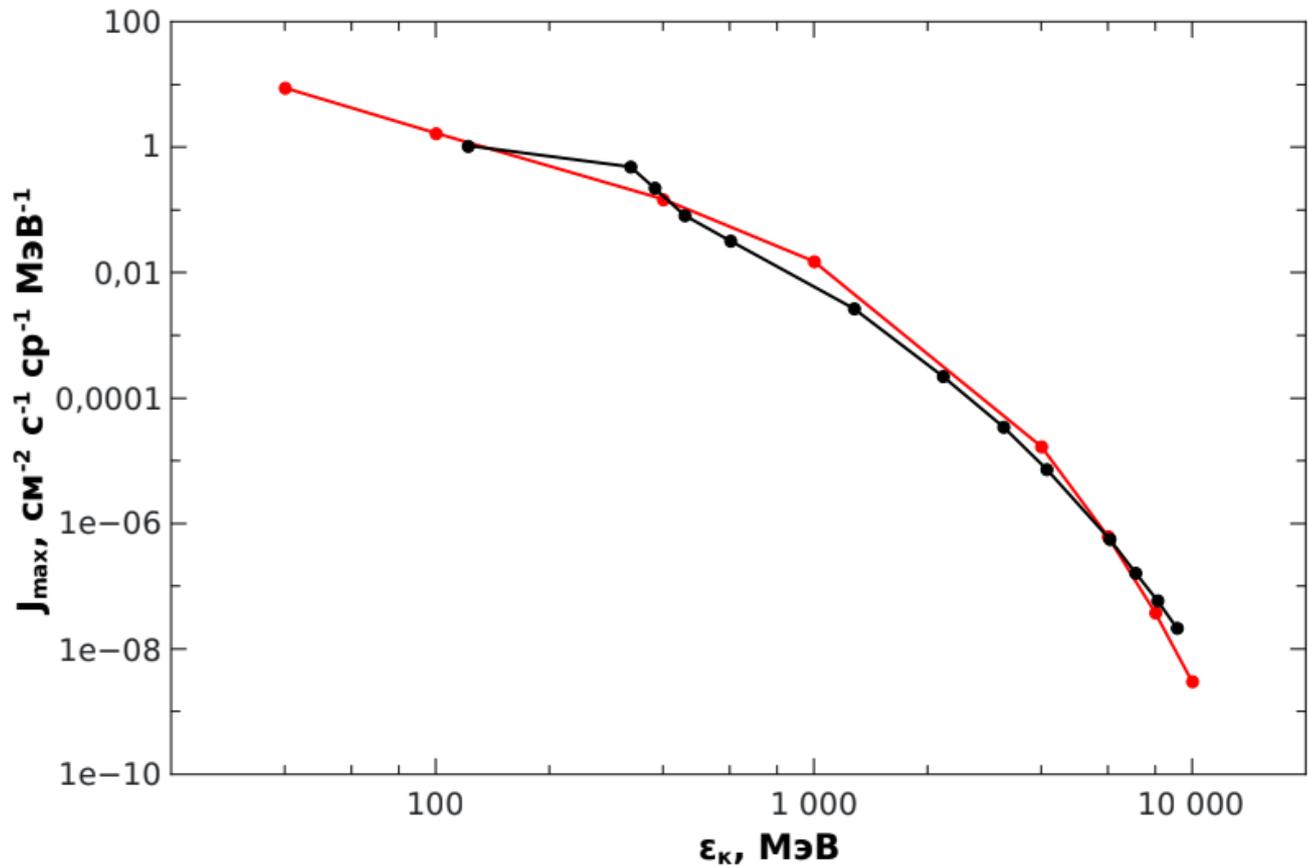


Рисунок 5. Спектр максимальных значений интенсивности СКЛ на орбите Земли в зависимости от энергии. Черная кривая — наблюдения (Бомбардье и др., *ApJ*, 2007), красная кривая — расчет.

Выводы:

Рассчитанная функция инжекции релятивистских СКЛ соответствует наблюдаемой в событии 15.04.2001.

Отсюда следует:

1. СКЛ в постепенных событиях генерируются в результате действия диффузионного (регулярного) механизма ускорения
2. Величины уровня турбулентности магнитного поля в солнечной атмосфере и межпланетном пространстве сильно различаются. Радиальный размер области перехода между величинами небольшой. Радиус области перехода равен 6 радиусам Солнца.
3. Коэффициент диффузии СКЛ в солнечной атмосфере в событии можно представить в виде:

$$k = k_0 \left(p / m_p c \right)^{2/3} \left(r / R_c \right)^{0.2} \text{ где } k_0 = 4.55 \cdot 10^{18} \text{ см}^2 / \text{с}$$

Это соответствует спектру турбулентности магнитного поля, представленного альвеновскими волнами,

$$E_v = E_0 \left(v / v_0 \right)^{-5/3} \left(r / R_c \right)^{-4.9} \text{ где } E_0 = 10^{-3} \text{ эрг} / \text{Гц}$$

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!!!