Секция А. Астрофизика и физика Солнца. БШФФ-2026. С. 124–126.

УДК 524.1
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-124
ORCID 0000-0003-0640-4869

СОПОСТАВЛЕНИЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СКЛ С НАБЛЮДЕНИЯМИ ПРОТОННЫХ СОБЫТИЙ

А.С. Петухова, И.С. Петухов, С.И. Петухов, Д.Д. Пинигин-Сосин

Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера Сибирского отделения Российской академии наук, Якутск, Россия, petukhova@ikfia.ysn.ru

COMPARISON OF NUMERICAL SIMULATION WITH OBSERVED PROTON EVENTS FOR SOLAR COSMIC RAY PROPAGATION

A.S. Petukhova, I.S. Petukhov, S.I. Petukhov, D.D. Pinigin

Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia, petukhova@ikfia.ysn.ru

Аннотация. На основе численного решения уравнения переноса в диффузионном приближении исследованы три солнечных протонных события 11 мая, 23 июля и 21 ноября 2024 г. Результаты моделирования сопоставлены с экспериментальными данными в десяти высокоэнергетическим дифференциальных каналах спутника GOES-16.

Ключевые слова: Солнечные космические лучи, распространение частиц, диффузия частиц.

Abstract. Three solar proton events on May 11, July 23, and November 21, 2024, were studied using a numerical solution to the transport equation in the diffusion approximation. These modeling results were compared with experimental data from ten high-energy differential channels of the GOES-16 satellite.

Keywords: Solar energetic particles, interplanetary propagation, particle diffusion.

ВВЕДЕНИЕ

Солнечные космические лучи (СКЛ) представляют собой потоки заряженных частиц, ускоренных в атмосфере Солнца до релятивистских энергий. В зависимости от доминирующего механизма ускорения различают импульсные и постепенные (gradual) протонные события; последние ассоциируются с ударными волнами, возникающими при корональных выбросах массы (КВМ), и могут генерировать протоны с энергиями порядка гигаэлектронвольт, вызывая наземные возрастания (GLE) [Reames, 2021]. Изучение таких событий необходимо для понимания физики ускорения и переноса частиц в турбулентном межпланетном магнитном поле, а также для оценки космических радиационных опасностей.

После генерации СКЛ инжектируются в межпланетное пространство, где их распространение описывается диффузионным уравнением переноса с учетом конвекции и адиабатического охлаждения [Reames, 2021; Strauss, le Roux, 2019]. В стандартной диффузионной модели частицы рассеиваются на резонансных альвеновских волнах, при этом интенсивные потоки протонов способны существенно модифицировать уровень турбулентности за счет волновой неустойчивости [Strauss, le Roux, 2019]. Количественное моделирование этих процессов позволяет воспроизвести наблюдаемые временные профили интенсивности и энергетические спектры, что является ключевым для верификации теорий ускорения и переноса СКЛ.

В данной работе генерация СКЛ явно не рассматривается, она учитывается через параметры потока инжектируемых частиц и определяется посредством их подбора. Результаты расчетов сопоставлены с данными измерений в десяти высокоэнергичных каналах на спутнике GOES-16 и определены параметры потока инжектируемых частиц.

МОДЕЛЬ

Модель распространения СКЛ основана на решении уравнения переноса с учетом диффузии, конвекции и адиабатического охлаждения. Задача одномерная (продольная диффузия много больше поперечной), учитывается спиральность межпланетного магнитного поля, зависящая от скорости солнечного ветра. Использовано квазиавтомодельное преобразование, которое позволяет сохранять интегральный закон (число частиц) и эффективно решать уравнение переноса в диффузионном приближении [Петухова и др., 2025].

Коэффициент диффузии задан в параметрическом виде:

$$k(r,p) = k_e \left(\frac{p}{mc}\right)^{\alpha} \left(\frac{r}{r_e}\right)^{\beta},$$

где k_e — нормировка коэффициента диффузии частиц с энергией 1 ГэВ на орбите Земли; α, β — параметры, задающие зависимость коэффициента диффузии от импульса и радиуса.

В качестве потока инжектируемых частиц использована функция

$$j_{inj} = A_{inj} \cdot ex\left(-a_{inj} \cdot t - \frac{b_{inj}}{t}\right),$$

A_{inj}, a_{inj}, b_{inj} — параметры, подбираемые к каждому событию.

В качестве объектов исследования из Каталога солнечных протонных событий 25-го цикла СА [https://swx.sinp.msu.ru/apps/sep_events_cat/index.php?gcm=1&lang=ru] были выбраны три события 2024 г.: 11 мая (GLE74), 23 июля и 21 ноября (GLE76). Для выбранных событий было определено время начала движения КВМ, которое используется при задании начала инжекции частиц. Начальные

параметры модели для трех событий приведены в табл. 1.

Таблица 1. Начальные параметры модели.

Характеристика/Событие	11 мая 2024 г.	23 июля 2024 г.	21 ноября 2024 г.
Выход КВМ	01:36	00:24	18:12
Начало события	01:50	00:50	18:20
Скорость СВ (км/с)	400	400	800
Сдвиг инжекции (ч)	–2	–1	0
Зависимость коэффициента диффузии от расстояния	1.05	0.4	1.3
Зависимость коэффициента диффузии от импульса частиц	0.9	1	0.65 → 1.5 (0 →1.22 часов) 1.5→ 1.3 (6.8 → 8.15 часов)
Нормировочный коэффициент диффузии (коэффициент диффузии на орбите Земли 1 ГэВ протона)	$2\cdot10^{22}$	$1\cdot10^{22}$	$4\cdot10^{22}$
a_j	2	3	2
b_j	0.5	0.5 → 0.1	0.5 → 0.1

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ОБСУЖДЕНИЯ

Экспериментальные данные для событий взяты из базы данных Центра анализа космической погоды НИИЯФ МГУ [https://swx.sinp.msu.ru/tools/davisat.php?gcm=1]. Для сопоставления использовались 5-минутные данные интенсивности протонов, зарегистрированные спутником GOES-16. Расчеты проводились для средней энергии в десяти дифференциальных каналах: 3400–6480 кэВ; 5840–11000 кэВ; 11640–23270 кэВ; 25900–38100 кэВ; 40300–73400 кэВ; 83700–98500 кэВ; 99900–118000 кэВ; 115000–143000 кэВ; 160000–242000 кэВ; 276000–404000 кэВ.

$$A_{inj}(z) = C \cdot ex(-gam \cdot z)\,,$$

$$z = lo(p)\,,$$

где C – нормировочная константа, определяется интенсивностью в самом высокоэнергетином канале. Показатель спектра gam не является единым для всей модели. Он подбирался итеративно, начиная с высокоэнергетичных каналов, и варьировался от канала к каналу для достижения наилучшего соответствия (рис. 1).

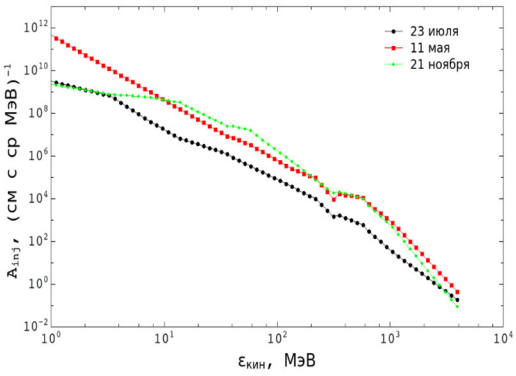

Рис. 1. Интегралы потока частиц за время события в зависимости от кинетической энергии инжектированных частиц для трех событий

Основными параметрами, определяющими распространение частиц в межпланетном пространстве, являются коэффициент диффузии и функция инжекции. Величина коэффициента диффузии влияет на время прихода СКЛ к орбите Земли, а также на последующий темп спада их потока. Чем выше коэффициент диффузии, тем быстрее частицы достигают Земли и тем резче падает их поток после прохождения максимума. В рамках представленного сопоставления значение коэффициента диффузии подбиралось на основе экспериментальных данных.

Однако для всех трех рассмотренных событий не удалось точно воспроизвести экспериментальные данные в рамках использованной модели. В связи с этим потребовалось введение дополнительных изменений параметров, таких как изменение коэффициента диффузии в течение события или «сдвиг инжекции». В модели начало инжекции было синхронизировано с экспериментально зарегистрированным началом движения КВМ. Например, для двух событий (11 мая и 23 июля) потребовалось ввести «сдвиг инжекции»: при значении коэффициента диффузии, обеспечивающем согласие моделируемого спада потока с наблюдениями, расчетное время прихода частиц к Земле оказалось соответственно на 2 и 1 ч позже фактического (рис. 2 и 3).

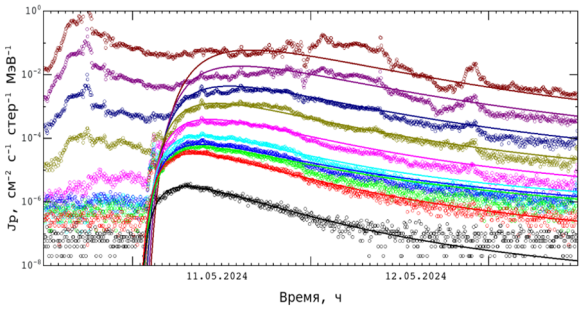

Рис. 2. Сопоставление экспериментальных данных и результатов расчета для события 11.05.2024

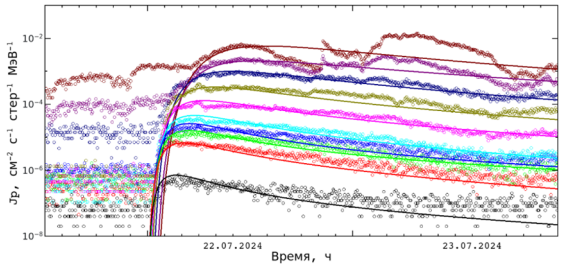

Рис. 3. Сопоставление экспериментальных данных и результатов расчета для события 22.07.2024

В отличие от первых двух событий, для события 21 ноября (рис. 4) потребовалось ввести не «сдвиг инжекции», а изменение коэффициента диффузии во времени. Временной профиль для частиц низких энергий имеет три характерных участка: участок роста — от 0 до 1.22 ч; участок постоянства — от 1.22 до 6.8 ч; участок уменьшения — от 6.8 до 8.15 ч.

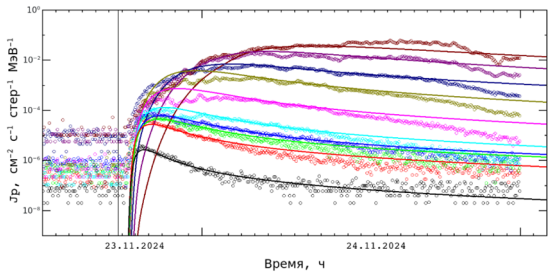

Рис. 4. Сопоставление экспериментальных данных и результатов расчета для события 23.11.2024

В модели функция инжекции для первого события не зависит от энергии частиц. Для второго и третьего событий потребовалось ввести энергетическую зависимость: инжекция протонов низких энергий происходит медленнее и длится дольше по сравнению с высокоэнергичными протонами.

Проведенный подбор параметров модели позволил получить приемлемое согласие с экспериментальными данными в рамках использованных допущений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате моделирования трех событий можно заключить, что предложенная модель хорошо описывает динамику интенсивности, зарегистрированную восемью высокоэнергетичными каналами, и удовлетворительно — еще двумя.

Ключевым несоответствием, требующим объяснения, остается сочетание почти одновременного прихода частиц всех энергий с сильно различающейся динамикой их последующего спада.

Это может указывать на неприменимость чисто диффузионного описания на начальной стадии события. Косвенным аргументом в пользу такого сценария служит заметное расхождение в данных спутников GOES-16 и GOES-19 в начале события 23 ноября 2025 г. при их последующем совпадении после максимума.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 126021217279-8).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Петухов И. С., Петухова А.С., Петухов С.И., Пинигин-Сосин Д.Д. Метод численного расчета пространственного распределения частиц при нестационарной диффузии в безграничной области // Космические исследования. 2025. Т. 63, № 6. С. 644–649.

Reames D.V. Solar Energetic Particles: A Modern Primer on Understanding Sources, Acceleration and Propagation. Springer, 2021. 233 p.

Strauss R.D., le Roux J.A. Solar Energetic Particle Propagation in Wave Turbulence and the Possibility of Wave Generation // The Astrophysical Journal. 2019. V. 872. P. 125.

URL: https://swx.sinp.msu.ru/apps/sep_events_cat/index.php?gcm=1&lang=ru (дата обращения 20.05.2026).

URL: https://swx.sinp.msu.ru/tools/davisat.php?gcm=1 (дата обращения 20.05.2026).