

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВРЕМЕННЫХ ПРОФИЛЕЙ СОБЫТИЙ В СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ

Рожкова Д.В.¹, Кашапова Л.К.¹, Мягкова И.Н.²

¹*Институт Солнечно-Земной Физики СО РАН, Иркутск, Россия*

²*НИИ Ядерной Физики МГУ, Москва, Россия*

MODELING OF TIME PROFILES OF EVENTS IN SOLAR ENERGETIC PARTICLES

Rozhkova D.V.¹, Kashapova L.K.¹, Myagkova I.N.²

¹*ISZF SB RAS, Irkutsk, Russia*

²*SINP MSU, Moscow, Russia*

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2023-281-284>

The paper presents the results of a numerical model testing. They allow reproducing the temporal profile shape of events in solar energetic particles (SEP), using simple assumptions about particle propagation in interplanetary space. Modelling of temporal profiles of SEP protons in the energy range of >30 MeV and above was carried out, assuming that particles only received acceleration in the solar atmosphere during a flare. Model testing for several events with flare sources located in the western hemisphere of the Sun and at the center of the solar disk, showed good agreement between observations and results of modelling. We did modelling of the temporal profile of the SEP event, which took place on October 21, 2003. Hypothetically, the source of this event was one of the flares occurring at behind the solar limb. The obtained results revealed that a significant increase in the SEP particle track length from the source on the Sun to the terrestrial orbit effects on the shape of the SEP event profile. This results in a gradual flux increase during the onset of the SEP event, while both impulsive and gradual SEP events related to flares on the solar disk demonstrated sharp flux rise.

События в солнечных космических лучах (СКЛ) в большинстве случаев связаны с солнечными вспышками и сопровождающими вспышки корональными выбросами массы (КВМ). На сегодняшний день принято рассматривать два основных механизма ускорения частиц СКЛ – ускорение во время вспышек в солнечной атмосфере и ускорение на ударных волнах КВМ, например, [1]. Доминирующий механизм ускорения частиц в событиях в СКЛ до сих пор не установлен. Кроме событий СКЛ, связанных со вспышками на видимой стороне Солнца, связь с которым, как правило, достаточно надежно определяется, события в СКЛ, зафиксированные на орбите Земли, также могут быть связаны со вспышками, произошедшими на обратной стороне Солнца. Для некоторых событий в СКЛ, которые не удалось связать со вспышками на диске Солнца, наблюдается форма временных профилей, не похожая на типичные профили ни импульсных, ни длительных событий. Основным отличием в условиях формирования событий СКЛ со вспышками-источниками на диске Солнца и на его обратной сто-

роне является более длинный путь, который проходят частицы СКЛ до регистрации на орбите Земли. Сделав предположение о временном профиле процессов ускорения во вспышке, мы можем промоделировать возможный временной профиль для события, связанного со вспышкой на обратной стороне Солнца. Целью данной работы было создание упрощенной модели распространения частиц СКЛ от источника на Солнце и проверка гипотезы об отличии формы временного профиля в событии СКЛ, источником которого была вспышка на обратной стороне Солнца.

Моделирование было проведено для временных профилей потоков протонов СКЛ с энергиями выше 30 МэВ, так как они более устойчивы к внешним воздействиям межпланетной среды, таким как, например, рассеяние. Мы предполагаем, что выход или инжекция заряженных частиц потока СКЛ из атмосферы Солнца в межпланетное пространство происходит в каждый момент времени фазы ускорения независимо друг от друга. Изменение со временем числа частиц для каждой энергии линейно связано с эволюцией процессов ускорения. В этом случае частицы СКЛ с одной энергией будут регистрироваться на орбите Земли с задержкой по времени, которую можно определить из скорости частиц и расстояния, которое они проходят. Суммируя временные профили протонов одной энергии, инжектированных в межпланетное пространство, мы получаем вероятный временной профиль события в СКЛ.

В работе Shih и др. [2] было показано, что процессы ускорения электронов свыше 300 кэВ и протонов выше 30 МэВ тесно связаны. Часто в качестве индикаторов процессов ускорения во время вспышек используют временные профили жесткого нетеплового рентгеновского излучения (ЖРИ) с энергией от 30 кэВ или производную мягкого рентгеновского излучения (МРИ), эффект Ньюперта [3]. В данной работе мы использовали любой доступный индикатор процессов ускорения для моделирования. В большинстве случаев это временной профиль ЖРИ для энергий свыше 25 кэВ и работ, опубликованных ранее [6–8].

Важным параметром модели является расстояние, которое проходят протоны от источника в атмосфере Солнца до Земли. Оно складывается из траектории, которая описывается спиралью Архимеда и спирального движения заряженных частиц вокруг этой траектории. Для упрощения, мы считаем, что если источник расположен в западной части диска Солнца, то траекторию движения частиц можно оценить, как половину длины окружности с диаметром 1 а. е. Для случаев, когда вспышка-источник расположена в центре диска и на обратной стороне Солнца будут введены коэффициенты, увеличивающие эту траекторию. Скорость частиц можно оценить, используя формулу из работы Reams и др. [4] или воспользоваться классической формулой кинетической энергии ($E = mv^2/2$).

Задержка оценивается для протонов с энергией 30–80 МэВ с шагом 0.5 МэВ в спектральном диапазоне 30–55 МэВ и 1 МэВ для диапазона 55–80 МэВ. Так как число частиц СКЛ имеют распределение по энергиям, то

для его определения была использована классическая формула $N = (E/E_0)^{-\delta}$, где E – кинетическая энергия частиц, а E_0 – пороговая энергия 10 МэВ, δ – степенной индекс спектрального распределения протонов СКЛ. Согласно экспериментальным данным в большинстве случаев $\delta = 2$ [5].

Первым событием, на котором было проведено тестирование, было событие в СКЛ, связанное со вспышкой 12 июня 2010 года. Вспышка была импульсная и располагалась в западной части солнечного диска (N23 W43). Вспышка была класса M2.0 по GOES, но при этом в ней были зафиксировано гамма-излучение [6]. Мы использовали временной профиль ЖРИ в диапазоне от 300 кэВ, полученный Konus-WIND [7]. Как видно на рис. 1, рассчитанный профиль точно воспроизводит фазу роста временного профиля потоков протонов СКЛ. Однако у полученного профиля в отличие от наблюдаемого получается более быстрый спад. Одной из возможных причин является то, что наша модель при расчетах не учитывает того, что с удалением от Солнца объем, занимаемый частицами в пространстве, будет увеличиваться. Поэтому были введены коэффициенты расширения и их применение позволило получить хорошее согласие между расчетным и экспериментальным профилями (рис. 1 правая панель).

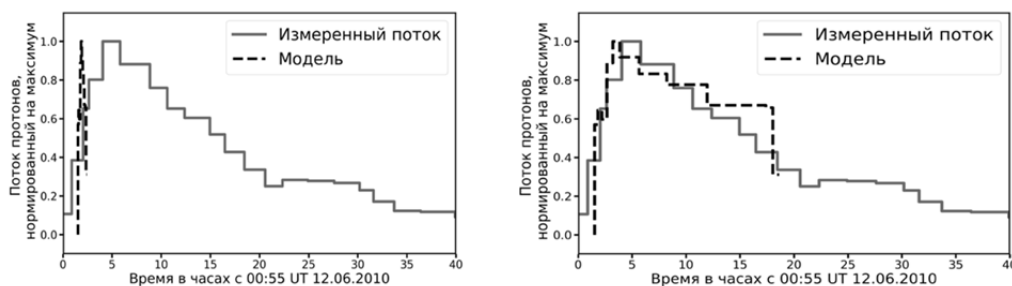


Рис. 1. Сравнение полученного модельного временного профиля и экспериментальных данных для события 12.06.2010. Левая панель: модельный профиль без введения коэффициентов расширения. Правая панель: модельный профиль с применением коэффициентов расширения

Смещение положения вспышки-источника должно приводить к увеличению траектории движения частиц СКЛ. В случае применения прежнего приближения (половины длины дуги расстояния до Земли), мы должны увидеть запаздывание прихода частиц СКЛ на модельном временном профиле по сравнению с наблюдаемым. Тестирование модели для события, источником которого была вспышка, произошедшая 24 февраля 2023 года в центре солнечного диска (N29 W24, класс вспышки M3.7), подтвердила существование такой задержки. Так как мы не имели информации о структуре магнитного поля, необходимой для точного расчета траектории движения, увеличение расстояния было сделано с помощью подбора множителя, позволяющего добиться совпадения расчетного времени прихода частиц СКЛ с наблюдаемым. На рис. 2 (левая панель) можно видеть, что модельный профиль дает хорошее согласие с экспериментальным при увеличении траектории в 1.4 раза. Для воспроизведения временного профиля

события в СКЛ, связанного со вспышкой, произошедшей на обратной стороне Солнца, выбрано событие источником которого могла быть одна из

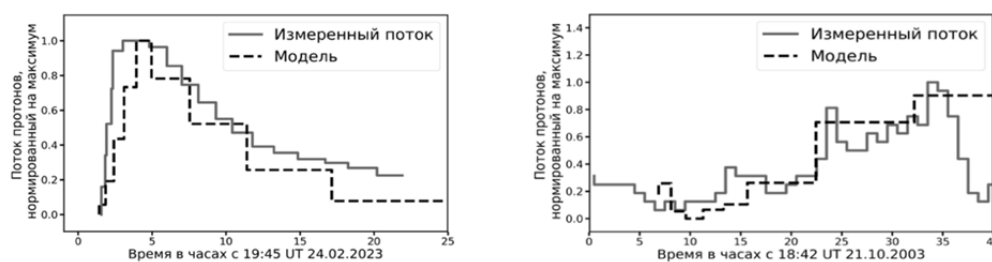


Рис. 2. Сравнение полученного модельного временного профиля и экспериментальных данных для событий 24.02.2023(левая панель) и 21.10.2003

вспышек, 21 октября 2003 года (в 15:40 UT и в 18:42 UT) из работы [6]. Так как эта вспышка располагалась не очень далеко от лимба, то в качестве индикатора процессов ускорения мы использовали производную МРИ. Для расчета временных профилей была увеличена длина траектории. Сравнение расчетных и наблюдаемых профилей СКЛ показало, что источником события в СКЛ наиболее вероятно является вспышка, произошедшая в 18:42 UT.

Выводы

Создана и протестирована упрощенная численная модель, позволяющая воспроизводить временной профиль потоков протонов с энергиями выше 30 МэВ, в предположении ускорения частиц во время солнечной вспышки непосредственно на Солнце. Полученные расчетные профили показали хорошее согласие с экспериментальными данными. В результате проведенного исследования было обнаружено, что увеличение длины траектории движения частиц СКЛ от источника на Солнце до приемника на орбите Земли приводит к постепенному росту потока протонов, в то время как для вспышек на диске Солнца наблюдается резкий подъем потока как для событий импульсного, так и длительного типа.

Авторы благодарят коллективы инструментов GOES, Konus-WIND за предоставление открытого доступа к данным наблюдений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России.

Литература

1. Klein, K.-L., Dalla S. // Space Sc. Reviews, 2017, V. 212, P. 1107.
2. Shih A.Y., Lin R.P., Smith D.M. // ApJ, 2009, V. 698, Issue 2.
3. Neupert W.M. // Astrophysical Journal, 1968, V. 153, P.L59.
4. Reames D.V. // Solar Physics., 2021, V. 296, P. 29.
5. Malandraki O.E., Crosby N.B. // Solar Particle Radiation Storms Forecasting and Analysis, 2018, P. 203.
6. Ackermann M. et al. // ApJ, 2012, V. 745, P. 144.
7. Pal'shin et al. // Geomagnetism and Aeronomy, 2014, 54, 943.
8. Лившиц М.А., и др. // Астрономический журнал, 2017, том 94, № 9, с. 778-792.