УДК 523.985

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЖЕКЦИИ ПРОТОНОВ В СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОННЫХ СОБЫТИЯХ ПО ИХ ВРЕМЕННОМУ ХОДУ

© 2021 г. Ю. П. Очелков*

Федеральное государственное бюджетное учреждение Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова, Москва, Россия

**E-mail: yur_och@mail.ru* Поступила в редакцию 25.02.2021 г. После доработки 12.03.2021 г. Принята к публикации 28.04.2021 г.

Предложен способ определения времени инжекции протонов с энергиями 10–100 МэВ в солнечных протонных событиях, обладающих свойством масштабного подобия. В таких событиях можно определить момент инжекции по временному ходу. На примере ряда событий показано, что инжекция протонов в них происходит при распространении коронального выброса масс в момент времени, когда он достигает расстояния один – полтора радиуса Солнца.

DOI: 10.31857/S0367676521080202

введение

Определение момента инжекции протонов в солнечных протонных событиях (СПС) имеет большое значение в решении вопроса о том, где ускоряются солнечные протоны: в солнечных вспышках или при движении корональных выбросов масс (КВМ). Этот вопрос является важнейшим в физике солнечных космических лучей и до сих пор не решен [1, 2]. Существуют различные точки зрения и различные подходы к его решению. Обычно исследуется начальная стадия СПС и по первому приходу протонов делаются попытки определить момент инжекции протонов в область свободного распространения [3, 4]. Недостатки такого подхода: использование только одного измерения для решения задачи и трудности определения времени распространения частиц от Солнца до Земли. Другой подход – определение момента инжекции по временному ходу - также встречается с трудностями, так как временные ходы событий СПС отличаются большим разнообразием из-за многообразия условий распространения частиц, и, поэтому, отсутствует достаточно хорошая их аппроксимация. В [5] было показано, что существуют события с достаточно простым временным ходом, который описывается функцией, одинаковой для всех энергий и событий и содержащей только один временной параметр. Это означает, что существует целый ряд событий, временной ход которых обладает свойством масштабного подобия (для энергий от 10 до 100 МэВ), что позволяет определять момент инжекции протонов в этих событиях по их временному ходу.

МАСШТАБНО-ПОДОБНЫЕ СОБЫТИЯ

Если временной ход зависит от одного временного параметра, то его можно записать в виде:

$$J(t) = J_m(E) f(t, \tau_1, \alpha(E)).$$
⁽¹⁾

В (1) J(t) – наблюдаемый поток протонов на орбите Земли, $J_m(E)$ — поток протонов в максимуме события, f – безразмерная функция, зависящая от одного макроскопического временного параметра τ_1 . В общем виде существует также зависимость от энергии протонов в виде параметра $\alpha(E)$. В [5] было показано, что зависимость от энергии отсутствует: $\alpha(E) = \text{const}(E)$ (по крайней мере, в диапазоне энергий от 10 до 100 МэВ). В этом случае можно говорить о существовании масштабного подобия и перейти к безразмерным переменным: $x = t/\tau_1$ и J/J_m (см. также [6]). Тогда временные профили таких событий будут описываться функцией одной переменной х для всех энергий из указанного выше диапазона. В качестве параметра τ_1 удобно выбрать интервал времени от момента инжекции Т_{іпі} протонов до момента времени достижения максимума в протонном событии $T_m: \Delta T_m = T_m - T_{ini}.$



Рис. 1. Аппроксимация временного хода события 15.04.2001. Точки — экспериментальные данные, жирная линия — зависимость (2), по которой определялось T_{inj} . Пунктир для (*a*) и (*б*) — зависимости (2) для $T_{inj} \pm 5$ мин, тонкие линии для (*a*) и (*б*) — зависимости (2) для $T_{inj} \pm 10$ мин.

В [5] показано, что временной профиль масштабноподобных событий хорошо описывается функцией:

$$lgJ(t) =$$

$$= lgJ_m - 3\left(lg\frac{t - T_{inj}}{\Delta T_m} - \left(1 - \frac{\Delta T_m}{t - T_{inj}}\right) / ln10\right).$$
(2)

Такая зависимость соответствует диффузионному распространению протонов в двумерном пространстве с коэффициентом диффузии, зависящим от расстояния r по степенному закону с показателем степени, равным 1 для всех энергий (от 10 до 100 МэВ).

Следует отметить, что масштабно-подобный временной ход часто искажается возмущениями особенно для малых энергий. На фазе максимума эти возмущения могут быть объяснены длительной инжекцией протонов [5], приводящей как бы к срезанию вершины кривой (см. рис. 16, 16), а на фазе спада влиянием ударной волны от KBM.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ИНЖЕКЦИИ ДЛЯ КОНКРЕТНЫХ СОБЫТИЙ

Аппроксимация реальных временных ходов с помощью зависимости (2) осуществлялась путем подбора параметра T_{inj} , при котором совпадение кривых (реального временного хода и аппроксимирующего) будет наилучшим. Из рис. 1*a*, 1*б* и 2*a*, 2*б* видно, что T_{inj} при этом можно определить с точностью ±5 мин. При этом нельзя использовать данные по интегральным энергетическим каналам, так как масштабное подобие справедливо для потоков протонов с определенной энергией.

С целью определения времени инжекции протонов в протонных событиях были построены временные ходы для следующих событий СПС: 4.11.1997, 6.11.1997, 15.04.2001, 20.05.2001, 13.12.2006 (17 временных ходов для разных энергий), обладающих свойством масштабного подобия, и в которых возмущения временного хода проявляются слабо. На рис. 1 и 2 приведены временные ходы для событий 15.04.2001, 13.12.2006 для разных энергий протонов. Как видно из рисунков, зависимость (2) достаточно хорошо описывает экспериментальные данные при одинаковом времени инжекции для всех энергий.

Для исследования временных ходов и анализа момента инжекции были использованы следующие данные: данные по потокам протонов с КА GOES с пятиминутным усреднением [7] (данные для каналов 10–30, 30–50, 50–60 и 60–100 МэВ получены путем вычитания данных интегральных каналов 10, >30, >50, >60, >100 МэВ); данные по мягкому рентгеновскому излучению с КА

1191

GOES (диапазон 0.1-0.8 нм) с минутным временным разрешением [7]): данные по жесткому рентгеновскому излучению RHESSI [8]; данные по КВМ (СМЕ) [9]; время инжекции релятивистских протонов, рассчитанное по первому их приходу, взято из [3] (это время с точностью до погрешностей совпадает с результатами [4] для событий 15.04.2001 и 13.12.2006). Все интенсивности потоков протонов в част. \cdot см⁻² \cdot с⁻¹ \cdot ср⁻¹, все временные параметры в минутах; на всех рисунках ось X – время в мин, начало отсчета – 00 UT для суток начала протонного события. Для всех величин, определяемых по электромагнитному излучению, время соответствует времени на Солние. Характерные времена для КВМ получены путем экстраполяции данных коронографов С2 и С3 LASCO.

В табл. 1 для каждого из событий приведены параметры $\lg J_m$, ΔT_m и T_{inj} , рассчитанные при экстраполяции временных ходов для разных энергий протонов (колонки 10–12). Из рис. 1 и 2 видно, что ошибка в определении T_{inj} не превышает 5 мин. В 4-ой колонке таблицы 1 приведено время максимума мягкой рентгеновской вспышки, в 5-ой – время ее начала, в 6-ой – время старта КВМ, в 7-ой – время достижения КВМ расстояний равных радиусу Солнца (R_s) и удвоенному радиусу Солнца, в 8-ой – время инжекции релятивистских протонов.

Как следует из полученных результатов, время инжекции протонов для всех 17 временных ходов (выделено жирным шрифтом) совпадает (с указанной точностью в 5 мин) со временем достижения КВМ расстояния $r = (1-2)R_s$ и не совпадает с другими характерными временами солнечной вспышки: $T_{sx,start}$, $T_{sx,max}$, T_{HXmax} (для события 13.12.2006 оно равно 151 мин).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как показало проведенное исследование, для всех 5 событий (4.11.1997, 6.11.1997, 15.04.2001, 20.05.2001, 13.12.2006) инжекция протонов связана с КВМ и происходит в момент достижения КВМ расстояния в $(1-2)R_s$. Инжекция начинается для всех энергий в диапазоне от 10 до 100 МэВ практически одновременно (с точностью до 5 мин). Для протонов малых энергий часто наблюдается длительная инжекция (с характерным временем инжекции, сравнимым с временем достижения максимума временного хода). Имеется существенное различие найденного времени инжекции с временем инжекции релятивистских протонов, определенным по первым наблюдением прихода релятивистских протонов. Причины различия требуют дополнительного анализа.



Рис. 2. Аппроксимация временного хода события 13.02.2006. Точки – экспериментальные данные, жирная линия-зависимость (2), по которой определялось T_{inj} . Пунктир для (*a*) и (*б*) – зависимости (2) для $T_{inj} \pm 5$ мин, тонкие линии для (*a*) и (*б*) – зависимости (2) для $T_{inj} \pm 10$ мин.

Таблица 1.	Параметры пр	отонных событий.	Пояснения см.	втексте
------------	--------------	------------------	---------------	---------

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Дата	класс, балл	λ, φ, град	T _{sx,start} , мин	<i>Т_{sx, max},</i> мин	T _{cme, start} , МИН	$T_{cme\ r} = Rs$ $T_{cme\ r} = 2Rs$, МИН	T _{RP inj} , мин	<i>Е_р</i> , МэВ	lg <i>J_m</i> , част./см ² · с · ср	Δ <i>Т_m</i> , мин	T _{inj} , мин
04.11.1967	X2.1 3B	S14 W34	350	347	300	318 340	_	>100 60–100	0.43 0.58	200 250	340 340
06.11.1997	X9.4 2B	S18 W63	707	703	682	690 698	726	>100 60–100 30–50	1.79 1.75 1.60	270 305 325	684 690 690
								>100			
15.04.2001	X14.4 2B	S20 W84	822	818	794	802	827	60–100 50–60 30–59	2.2 2.15 1.9 2.5	120 150 160 190	805 805 805 805
20.05.2001	M6.4 -	S18 W90	355	353	310	331 352	_	>100 60—100	0.1 0.15	215 255	337 340
								>100	1.95	160	135
								60-100	2.13	180	135
13.12.2006	X3.4	S07	152	128	130	137	158	50-60	1.9	217	130
	4B	W24						40-80	1	200	130
								80-165	0.025	155	135
								165-500	-0.58	140	135

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЖЕКЦИИ ПРОТОНОВ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Cane H.V., Lario D. // Space Sci. Rev. 2006. V. 123. P. 45.
- Trottet G., Samwel S., Klein K.-L. et al. // Solar Phys. 2015. V. 290. No. 3. P. 819.
- 3. Bazilevskaya G.A. // Adv. Space Res. 2009. V. 43. P. 530.
- 4. Reams D.V. // Astrophys J. 2009. V. 706. P. 844.
- 5. Очелков Ю.П. // Гелиогеофиз. иссл. 2018. Т. 19. С. 47.
- 6. *Беловский М.Н., Очелков Ю.П.* // Геомагн. и аэроном. 1981. Т. 21. № 5. С. 793.
- 7. https://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/avg.
- 8. https://hesperia.gsfc.nasa.gov/rhessi3.
- 9. https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list.

Determination of the moment of proton injection in solar proton events by their time profile

Yu. P. Ochelkov*

Institute of Applied Geophysics, Moscow, 119517 Russia *e-mail: yur och@mail.ru

We propose a method for determining the injection time of solar protons with energies of 10-100 MeV in solar proton events that have the property of scale similarity (scailing). It is shown that in such events it is possible to determine the time of injection by their time profile. It is shown by the example of a series of events that the injection of protons in them occurs when the coronal mass ejection propagates at the time when it reaches a distance of one or one and a half Solar radii.