

## ВЫХОД УСКОРЕННЫХ ПРОТОНОВ В СОЛНЕЧНЫХ ЭРУПТИВНЫХ СОБЫТИЯХ

В.И. Киселев, В.В. Гречнев, А.А. Кочанов, А.М. Уралов

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия  
valentin\_kiselev@iszf.irk.ru

## RELEASE OF PROTONS ACCELERATED IN SOLAR ERUPTIVE EVENTS

V.I. Kiselev, V.V. Grechnev, A.A. Kochanov, A.M. Uralov

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia

**Аннотация.** Задержка выхода ускоренных ионов у Солнца относительно вспышки считается подтверждением их ускорения головной ударной волной, возникающей перед корональным выбросом массы, превысившим альфвеновскую скорость. Возможно другое объяснение задержки выхода частиц. Часть ускоренных во вспышке электронов и ионов захватывается в расширяющемся магнитном жгуте. Его последующее пересоединение с открытыми корональными структурами открывает доступ в межпланетное пространство всем захваченным частицам. Для проверки этого сценария рассмотрены дека/гектометровые (ДГМ) всплески III типа, вызванные быстрыми электронами. Мы сравнили оцененные Д. Римсом [Reames, 2009] для 13 событий времена выхода тяжелых частиц с началом ДГМ-всплесков III типа. Для 11 событий разница не превысила пяти минут. Для двух событий оцененные времена выхода оказались нереалистично поздними, вероятно, из-за неучтенных эффектов распространения тяжелых частиц. Рассмотренный сценарий решает проблему выхода ускоренных протонов из области вспышки, а близость вероятных времен выхода энергичных частиц и ДГМ-всплесков III типа подтверждает ускорение частиц вспышечными процессами.

**Ключевые слова:** протонные возрастания, флюенс протонов, микроволновые всплески.

**Abstract.** The delay of release time of accelerated ions near the Sun with respect to a flare is considered as confirmation of their acceleration by a bow shock driven by a coronal mass ejection exceeding the Alfvén speed. Another explanation of a delayed particle escape is possible. Some part of electrons and ions accelerated in a flare is trapped in an expanding magnetic flux rope. Its later reconnection with open coronal structures grants all trapped particles the access to the interplanetary space. We verify this scenario using deca/hectometric (DH) Type III bursts caused by fast electrons. We compare the release times of heavy particles estimated by D. Reames [Reames, 2009] for 13 events with onset times of DH Type III bursts. The difference did not exceed five minutes for 11 events. In two events, the estimated particle release times were unrealistically late, probably because of propagation effects of ions disregarded. The scenario considered addresses the challenge of release of accelerated protons from the flare region. The closeness of the probable release times of energetic particles and DH Type III bursts confirms acceleration of particles by flare processes.

**Keywords:** proton enhancements, proton fluence, microwave bursts.

### Введение

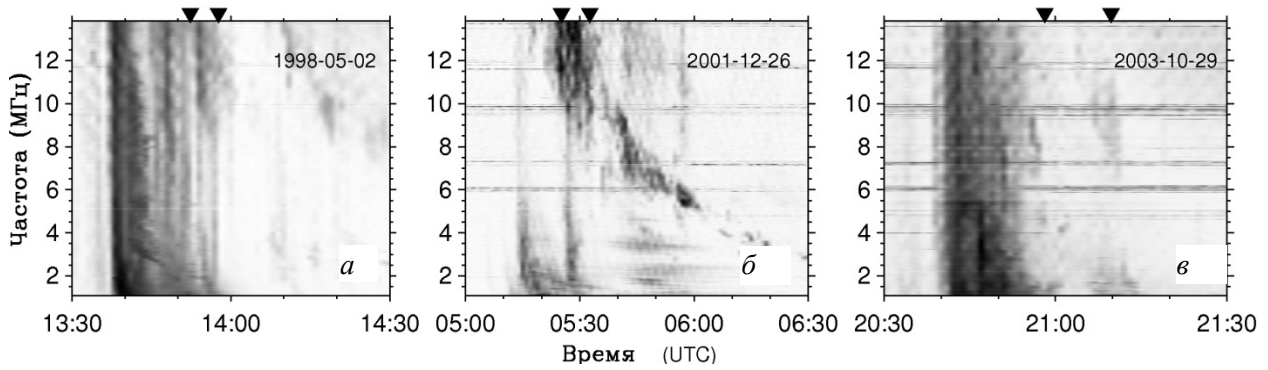
Задержанный относительно вспышек выход ионов у Солнца в межпланетное пространство считается подтверждением их ускорения головной ударной волной, возникающей перед быстрым корональным выбросом массы (КВМ) после превышения им альфвеновской скорости в окружающей среде [Reames 2009]. В рамках этой традиционной гипотезы процессы ускорения частиц ударной волной и в области вспышки предполагались настолько разделенными в пространстве и времени, что их взаимозависимость исключалась. Однако недавние исследования показали, что связь между солнечными вспышками, эрупциями, ударными волнами и КВМ более тесная, чем считалось ранее [Zhang et al., 2001; Temmer et al., 2008; Grechnev et al., 2013], а ударная волна возникает уже в импульсной фазе вспышки [Grechnev et al., 2017]. Поэтому ударная волна может ускорить тяжелые частицы раньше, чем предполагалось, и значительная задержка их ускорения относительно вспышки не ожидается.

Задержанный выход энергичных частиц можно объяснить их переносом расширяющимся магнитным жгутом, в который они инжектируются при вспышечном пересоединении, и их последующим выходом в межпланетное пространство при пересоединении жгута с открытой корональной структурой — стримером или корональной дырой [Grechnev

et al., 2013; Masson et al., 2013]. Для проверки этого сценария сравнены оцененные времена выхода ионов у Солнца с началом дека/гектометровых (ДГМ) всплесков III типа, вызванных потоками быстрых электронов, уходящих в межпланетное пространство. В это же время возможен и выход тяжелых частиц. Это предположение подтверждено для события 26 декабря 2001 г., вызвавшее наземное возрастание интенсивности космических лучей (GLE63, рис. 1, б) [Grechnev et al., 2017]. Всплески III типа наблюдались вплоть до километрового диапазона, что указывает на распространение частиц до орбиты Земли. Для проверки общности этого сценария мы рассмотрим времена выхода, оцененные Д. Римсом [Reames, 2009] из анализа дисперсии скоростей ионов разных энергий в 13 солнечных событиях 23-го цикла, вызвавших GLE, для которых имеются данные космического радиоспектрографа Wind/WAVES (с 1994 г.). Мы также оценим отношение числа электронов и протонов при переносе магнитным жгутом в сравнении с их прямым выходом из области вспышки.

### Сравнение времени выхода частиц от Солнца с началом ДГМ-всплесков III типа

В каждом событии было от одного до четырех мощных ДГМ-всплеска III типа. В большинстве



Динамические спектры WIND/Waves/Rad2 в событиях 2 мая 1998 г. (GLE56, *а*), 26 декабря 2001 г. (GLE63, *б*) и 29 октября 2003 г. (GLE66, *в*). Треугольниками отмечены границы интервалов, оцененные Д. Римсом для времени выхода ионов

событий время выхода ионов оказалось близким к началу одного из всплесков III типа, но ни в одном случае не раньше их. Совпадение было в семи событиях, в четырех интервал между всплесками III типа и временем выхода ионов не превышал пяти минут (рис. 1 *а*, *б*). Для двух событий оцененное время выхода ионов оказалось значительно позже начала ДГМ-всплесков (GLE58, 24 августа 1998 г., ~30 мин. и GLE66, 29 октября 2003 г., ~15 мин).

Оцененное время выхода ионов в событии 29 октября 2003 г. [Reames, 2009] было слишком поздним относительно как возникшей в этом событии ударной волны, проявлявшейся как волна Мортонна [Balasubramaniam et al., 2007] и всплеск II типа, так и начала протонного возрастания и GLE66 (рис. 1, *в*). Это событие произошло на фоне сильнейшего после 1978 г. Форбуш-понижения, вызванного огромным магнитным облаком. Его движение со скоростью 1900 км/с [Grachnev et al., 2014] влияло на магнитные пути частиц разных энергий, искажая результаты анализа дисперсии скоростей.

Для события 24 августа 1998 г. (GLE58) оцененное время выхода ионов также было слишком поздним по сравнению с наблюдавшимися волной Мортонна, всплеском II типа [Vršnak et al., 2002] и началом протонного возрастания. Явных аномалий в околоземной среде не было. Несоответствие в этом событии может объясняться энергозависимыми эффектами распространения ускоренных ионов (дрейфы, диффузия), особенно существенными из-за восточного расположения солнечного источника (E09N35).

Итак, большая задержка оцененного времени выхода ионов относительно начала ДГМ-всплесков III типа в двух событиях — следствие недооценки ошибок анализа дисперсии скоростей из-за неучтенных эффектов распространения. Вероятно, реальное время выхода ионов во всех 13 рассмотренных событиях близко к началу мощных ДГМ-всплесков III типа, вызванных уходящими электронами. Это подтверждает перенос ускоренных частиц магнитным жгутом. Этот сценарий проясняет и выход из активной области протонов, ускоренных вспышечными процессами. Анализ двух из этих событий (GLE56, 2 мая 1998 г. и GLE67, 2 ноября 2003 г.) в работе [Kochanov et al., 2017] привел к аналогичному сценарию.

Задержка выхода ионов относительно вспышки не позволяет установить их источник. Ситуацию осложняет возможность их практически одновременного ускорения во вспышке и на ударной волне, образующейся при ускорении эруптивного волокна, запускающего процесс вспышечного переключения (а не наоборот). Тем не менее, близость времени выхода ионов и начала ДГМ-всплесков III типа не подтверждает значимого вклада ускорения ударными волнами в исследованных событиях по следующим причинам. Если бы электроны, генерирующие всплески III типа, ускорялись ударным фронтом, то длительность декаметровых всплесков III типа была сравнимой со временем жизни радиоисточника II типа, что противоречит наблюдениям. Признаки такого ускорения — «елочная» структура всплесков II типа — указывают на быструю релаксацию электронных потоков. Значит, ответственные за ДГМ-всплески III типа быстрые электроны рождены во вспышке. Близость моментов выхода их и тяжелых ионов в подавляющем большинстве исследованных событий вряд ли является случайным совпадением с началом ускорения тяжелых ионов на ударном фронте.

#### Отношение числа электронов к числу протонов при переносе магнитным жгутом

Нашему выводу о статистическом преобладании вспышечного вклада в ускорение протонов высоких энергий [Grachnev et al., 2015] возразил Клайвер [Cliver, 2016]. Он отметил, что отношение числа энергичных электронов к числу протонов в «постепенных» событиях, где ускорение ударными волнами считается доминирующим, на два порядка ниже, чем в «импульсных» событиях, связываемых со вспышечным ускорением. Однако причиной этого различия могут быть кулоновские столкновения частиц, переносимых магнитным жгутом.

Средняя длина свободного пробега  $\lambda_i$  быстрых ионов с массой  $m_i$ , зарядом  $e_i$  и начальной скоростью  $v_0$  в плазме с концентрацией  $n$  составляет  $\lambda_i = m_i m_e v_0^4 / (16 \pi e_i^2 e_e^2 \Lambda n)$ , где  $\Lambda \approx 10$  — кулоновский логарифм,  $e_e$  и  $m_e$  — заряд и масса электрона. Тогда время жизни ионов  $\tau_{coll(i)} \approx \lambda_i / v_0$ . Время жизни релятивистских электронов с энергией  $E_e$  равно

$\tau_{\text{life}(e)} \approx 2.6 \cdot 10^9 E_e/n$ . Например, время жизни протонов с энергией 100 МэВ превышает время жизни электронов с кинетической энергией 0.5 МэВ в той же плазме на два порядка величины. Быстрая релаксация электронов на кулоновских столкновениях в магнитном жгуте резко снижает отношение числа энергичных электронов к числу протонов при начальной концентрации плазмы в нем  $n > 10^{10} \text{ см}^{-3}$  по сравнению с прямым выходом частиц из области вспышки.

### Выводы

Задержка времени выхода в межпланетное пространство тяжелых ускоренных частиц относительно вспышки объясняется не временем, требуемым для ускорения КВМ, а переносом частиц в магнитном жгуте до его пересоединения с открытыми структурами.

По-видимому, неопределенности анализа дисперсии скоростей ионов, выполненного Д. Римсом, были недооценены из-за неучтенных эффектов их распространения.

При переносе магнитным жгутом частиц, ускоренных во вспышке, отношение числа электронов к числу протонов может быть значительно снижено из-за быстрой потери энергии электронами на кулоновских столкновениях в жгуте.

Авторы благодарны коллективу космического проекта Wind/WAVES за использованные данные. Работа выполнена при поддержке программы ФНИ гос. академий наук на 2013–2020 гг.: П.16.3.2. «Нестационарные и волновые процессы в солнечной атмосфере». Рег. № ЦИТИС 01201281650 и П.16.1.6. «Геоэффективные процессы в хромосфере и короне Солнца». Рег. № ЦИТИС 01201281652.

### Список литературы

- Balasubramaniam K.S., Pevtsov A.A., Neidig D.F. Are Moreton waves coronal phenomena? // *Astrophys. J.* 2007. V. 658, iss. 2. P. 1372–1379.
- Cliver E.W. Flare vs. shock acceleration of high-energy protons in solar energetic particle events // *Astrophys. J.* 2016. V. 832, iss. 2. article id. 128.
- Grechnev V.V. et al. An updated view of solar eruptive flares and the development of shocks and CMEs: history of the 2006 December 13 GLE-productive extreme event // *PASJ* 2013. V. 65. SP1. S9. P. 18.
- Grechnev V.V., et al. A challenging solar eruptive event of 18 November 2003 and the causes of the 20 November geomagnetic superstorm. IV. Unusual magnetic cloud and overall scenario // *Solar Phys.* 2014. V. 289, iss. 12. P. 4653–4673.
- Grechnev V.V., Kiselev V.I., Meshalkina N.S., Chertok I.M. Relation between microwave bursts and near-Earth high-energy proton enhancements and their origin // *Solar Phys.* 2015. V. 290, iss. 10. P. 2827–2855.
- Grechnev V.V., Kiselev V.I., Uralov A.M., Klein K.-L., Kochanov A.A. The 26 December 2001 solar eruptive event responsible for GLE63. III. CME, shock waves, and energetic particles // Submitted to *Solar Phys.* in 2016.
- Kocharov L., et al. Investigating the origins of two extreme solar particle events: proton source profile and associated electromagnetic emissions // *Astrophys. J.* 2017. V. 839, iss. 2. Article id. 79.
- Masson S., Antiochos S.K., DeVore C.R., A model for the escape of solar-flare-accelerated particles // *Astrophys. J.* 2013. V. 771, iss. 2. article id. 82.
- Reames D.V. Solar release times of energetic particles in ground-level events // *Astrophys. J.* 2009. V. 693, iss. 1. P. 812–821.
- Temmer M., et al. Acceleration in fast halo CMEs and synchronized flare HXR bursts // *ApJ.* 2008. V. 673, iss. 1. article id. L95.
- Vršnak B., Warmuth A., Brajša R., Hanslmeier A. Flare waves observed in helium I 10 830 Å. A link between H $\alpha$  Moreton and EIT waves // *A&A.* 2002. V. 394. P. 299–310.
- Zhang J., Dere K.P., Howard R.A., Kundu M.R., White S.M. On the temporal relationship between coronal mass ejections and flares // *Astrophys. J.* 2001. V. 559, iss. 1. P. 452–462.