

УДК 523.98

Об особенностях изменений энергетических спектров ионов во вспышечных потоках солнечных космических лучей

Г.С. Минасянц¹, Т.М. Минасянц¹, В.М. Томозов²

¹Астрофизический институт им. В.Г. Фесенкова НАН РК (АФИФ), Алматы, Казахстан, 050020
gennadii.minasya@mail.ru

²Институт солнечно-земной физики СО РАН (ИСЗФ), Иркутск, Россия, 664033
tom@iszf.irk.ru

Поступила в редакцию 29 октября 2015 г.

Аннотация. Известно, что наиболее мощные явления солнечных энергичных частиц происходят в результате совместного действия механизмов ускорения частиц в процессе пересоединения магнитных полей в солнечных вспышках и на фронтах ударных волн (УВ), возникающих при движении корональных выбросов массы (КВМ) в короне и межпланетной среде, сопутствующих вспышкам. Поведение энергетических спектров потоков частиц, ускоренных этими двумя основными механизмами, содержит важную информацию о процессах ускорения частиц и об их распространении в межпланетной среде до Земли. Предварительные результаты показали, что фронты ударных волн от КВМ оказывают существенное влияние на структуру спектров потоков ускоренных частиц в тех относительно редких случаях, когда возникают усиленные потоки протонов с энергиями > 60 МэВ и интенсивностью более 10^2 протонов/(см²·сек·ср), ускоренных ударными волнами. При этом наблюдаются резкие изломы спектров ионов в области энергий 1.5–2.5 МэВ. Рассмотрено три подобных случая (14–15 июля 2000 г.; 24–25 сентября 2001 г.; 8–10 ноября 2000 г.). Для выяснения степени влияния фронта УВ на структуру и элементный состав потоков ионов для этих событий солнечных космических лучей (СКЛ) по измерениям с космических аппаратов (КА) приведены спектры энергий ионов H, He, O и Fe до и после прихода ударной волны. Проанализированы возможные причины резкого изменения характера спектров ионов в этом интервале энергий. Представлено качественное объяснение вариации отношения Fe/O в этих событиях на основе FIP-эффекта.

ABOUT FEATURES OF ION'S ENERGY SPECTRA VARIATIONS IN COSMIC RAY FLUXES FROM SOLAR FLARES, *by G.S. Minasyants, T.M. Minasyants, V.M. Tomozov.* The most powerful phenomena of solar energetic particles are known to occur as a result of joint action of particle acceleration mechanisms in the process of magnetic field reconnection in the solar flares and on the fronts of shock waves generated by moving coronal mass ejections (CME) in the corona and interplanetary medium which are related with flares. The behavior of energy spectra of particle streams accelerated by two main mechanisms contains important information about particle acceleration and their propagation in the interplanetary medium to the Earth. The preliminary results have shown that CME shock fronts have a significant impact on the spectral structure of the accelerated particle fluxes in the relatively rare cases when there are enhanced proton fluxes with energies of greater than 60 MeV with intensity higher than 10^2 p/(cm²·sec·sr), accelerated by shock waves. At the same time the sharp breaks of ion spectra in the energy range of 1.5–2.5 MeV are observed. We considered three such cases (July 14–15, 2000; September 24–25, 2001; November 8–10, 2000). Ion energy spectra of

Об особенностях изменений энергетических спектров ионов...

H, He, O and Fe before and after the arrival of the shock wave were given to determine the degree of the shock wave influence on the structure and elemental composition of the ion fluxes for these events of solar cosmic rays (SPE) on measurements from spacecrafts. The possible causes of sharp changes in the character of the ion spectra in this energy range were analyzed. We present a qualitative explanation of variations in the ratio Fe/O in these solar events based on the FIP effect.

Ключевые слова: Солнце, спектры энергии СКЛ, FIP-эффект

1 Введение

Мощные солнечные вспышки и связанные с ними корональные выбросы массы (КВМ) являются эффективными ускорителями частиц высоких энергий – солнечных космических лучей (СКЛ), которые иногда проявляются и на наземном уровне (явления GLE). Вспышки и выбросы плазмы возникают в сложных эволюционирующих магнитных структурах на Солнце – активных областях. Магнитные поля, усиленные в конвективной зоне механизмом динамо, выходя на поверхность Солнца, формируют активные области, поля которых распространяются до корональных высот солнечной атмосферы. Благодаря движениям фотосферного вещества, которые непрерывно усложняют структуру вышележащего поля, происходит накопление свободной магнитной энергии и возникновение токовых слоев в магнитных конфигурациях. После достижения определенного порога устойчивости магнитной структуры в ней происходит взрывообразное выделение свободной энергии – возникает вспышка, сопровождаемая ускорением частиц, выбросом плазменного волокна и частичным раскрытием магнитной структуры в активной области. Добавим, что кинетическая энергия выбросов, образующих КВМ, может на порядок превышать энергию самой вспышки в оптическом диапазоне. Наблюдательными проявлениями, указывающими на раскрытие магнитных структур во время вспышек, являются радиовсплески III типа (причина – радиоизлучение потоков энергичных электронов в корональных слоях и в межпланетной среде) и всплески радиоэмиссии II типа, связанные с излучением на фронтах ударных волн. Основным физическим механизмом, приводящим к вспышкам и выбросам, является процесс пересоединения магнитных полей в токовых слоях магнитных структур (Алтынцев и др., 1982; Прист, Форбс, 2005).

Одним из основных процессов ускорения частиц непосредственно в зоне вспышек является ускорение электрическими полями в ходе диссипации магнитной энергии в токовых слоях и плазменной турбулентностью вследствие развития различных плазменных неустойчивостей (Алтынцев и др., 1982; Сомов, 2012). Высокая эффективность ускорения ионов и электронов при моделировании процесса магнитного пересоединения в токовых слоях была подтверждена лабораторными экспериментами на плазменных установках (например, Томозов, Строкин, 2015).

Другим механизмом ускорения частиц в явлениях СКЛ, преимущественно ускоряющим протоны и более тяжелые ионы, является ускорение частиц ударными волнами, образующимися перед высокоскоростными выбросами КВМ, которые при распространении их в межпланетной среде и в ходе своего расширения могут заполнить большой объем гелиосферы. Вследствие этого в сложных событиях (вспышка + КВМ) спектры энергичных частиц СКЛ должны носить смешанный характер. Характеристики процессов ускорения частиц лежат в основе деления явлений СКЛ на импульсные и длительные события. Вспышки СКЛ, относящиеся к классу длительных событий, приводят к самым мощным и продолжительным потокам энергичных частиц. В таких явлениях проявляются два основных механизма ускорения частиц (например, Клекер, 2013). Подобные явления и будут предметом рассмотрения в этой статье. По значениям целого ряда параметров можно установить принадлежность вспышек к тому или иному

классу (Римс, 1995), хотя в настоящее время считается, что представление о делении СКЛ на два класса является несколько упрощенным (Клекер, 2013), поскольку в некоторых явлениях разных классов выявляется ряд общих характеристик. Вследствие этого Кейн и др. (2006) в качестве основного показателя для определения двух классов событий предложили использовать отношение элементов Fe/O. Отметим, что величина отношения Fe/O в составе СКЛ оказывается мерой проявления эффекта первого потенциала ионизации – FIP. Железо относится к элементам с низким FIP < 10 эВ, обилия которых в верхней атмосфере Солнца повышены в несколько раз вследствие влияния FIP-эффекта, а содержание кислорода остается близким к фотосферному содержанию, поскольку его потенциал ионизации превышает граничное значение 10 эВ (Томозов, 2012, 2013).

Одной из важных характеристик вспышечных потоков ускоренных частиц в событиях СКЛ является поведение их энергетических спектров. Изучение формы энергетических спектров позволяет получить информацию о процессах ускорения частиц и дальнейшем их распространении от Солнца к Земле, поэтому в этой работе будут приведены результаты анализа спектров трех энергичных событий СКЛ с целью выявления механизмов ускорения частиц и проявлений FIP-эффекта.

2 Анализ данных и обсуждение результатов

Обычно для подобного анализа используются спектры энергии, построенные для всего периода существования усиленного вспышечного потока частиц по значениям интенсивности потоков в отдельных энергетических интервалах, т. е. усредненную картину по всему времени существования потока. С целью получения более детальной картины развития потока СКЛ и его структурных свойств были использованы спектры энергии с разрешением по времени в 1 час.

При построении энергетических спектров СКЛ в течение 23-го цикла активности (1997–2008 гг.) для элементов H, He, O и Fe использовались данные, полученные на космических аппаратах (КА) IMP, GOES, SOHO, ACE, Wind. Для выявления систематических ошибок наблюдений, проведенных на различных инструментах КА, было проведено сопоставление их результатов. Приняты во внимание выводы научных групп сопровождения работы инструментов на орбите, а также учтены рекомендации в работах (Мивальдт и др., 2005, 2009; Римс и Нг, 2010) при расчетах спектров энергии. В итоге были определены интервалы энергии с достаточно надежными значениями потоков ионов в области (0.04–287.23) МэВ/нуклон. Спектры энергии потоков для выбранных элементов были получены с помощью опции “Multi-source spectral plots of energetic particle fluxes” на сайте OMNIWeb Plus Browser. Значения энергии ионов выражены в МэВ/н и, соответственно, потоки – в частицах/(см²·сек·ср·МэВ/н).

Использование часовых значений спектров энергии позволило выявить несколько новых особенностей в структуре потоков СКЛ. Было установлено, что по виду спектров в ходе эволюции вспышечных потоков можно выделить две основные фазы – возмущенную и спокойную. Они отличаются, в первую очередь, степенью гладкости кривых – возмущенная стадия характеризуется сильными изгибами спектров при возрастании потока ускоренных частиц, спокойная фаза – довольно гладкими кривыми, которые показывают постепенное уменьшение количества вспышечных частиц до фоновых значений (Минасянц, Минасянц, 2014).

В результате сканирования мощных вспышечных потоков спектрами энергии с разрешением 1 час была выявлена интересная особенность – присутствие скачка интенсивности потока в спектре различных элементов в области энергии (1.5–2.5) МэВ/н. Заметные скачки были отмечены также в спектрах вспышечных потоков 11 событий СКЛ. Характерным свойством всех этих явлений оказалось присутствие в потоках частиц протонов с энергией, превосходящей 60 МэВ, и интенсивностью, превышающей 10² протонов/(см²·сек·ср). Такие потоки наблюдались в интервалах времени от нескольких часов до суток.

Об особенностях изменений энергетических спектров ионов...

Для события 8–10 ноября 2000 г. на рис. 1а приведены спектры энергии со скачками интенсивности потоков H, He, O и Fe в интервале энергии (1.5–2.5) МэВ/н в течение 9 ноября в 00^h–10^h UT при $F_{p>60 \text{ МэВ}} = 9 \cdot 10^2$ протонов/(см²·сек·ср). Отсутствие изломов в спектрах во время спокойного развития вспышечного потока этого же события показано на рис. 1б – 10 ноября в 01^h–05^h UT при $F_{p>60 \text{ МэВ}} = 7 \cdot 10^1$ протонов/(см²·сек·ср).

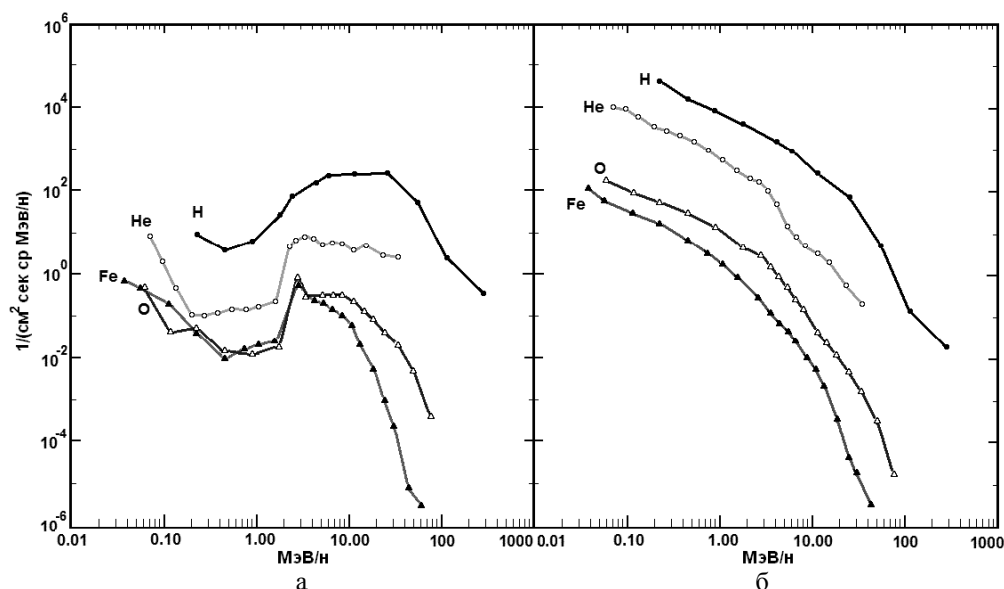


Рис. 1. Спектры энергии H, He, O, Fe для события 8 ноября 2000 г. в периоды – (а) существования резких скачков интенсивности и – (б) спокойной стадии развития вспышечного потока

Предварительное изучение показало, что заметное влияние фронт ударной волны (УФ) прибывающего коронального выброса оказывает на структуру вспышечного потока в тех случаях, когда существуют усиленные потоки ускоренных высокоэнергичных протонов. Из всех событий СКЛ, в течение 1997–2008 гг., имевших при развитии вспышечного потока значения $F_{p>60 \text{ МэВ}} > 10^2$ в момент прибытия ударной волны коронального выброса к орбите Земли, выявлено всего три явления. Ниже приведено рассмотрение двух событий СКЛ, в которых прибытие УФ происходило в периоды существования резких скачков интенсивности в спектрах энергий. Чтобы оценить влияние УФ на структуру вспышечного потока, для этих событий построены спектры энергий H, He, O и Fe в периоды времени до и после прибытия УФ. На рис. 2 и 3 показаны соответственно спектры энергии для 24–26 сентября 2001 г. (УФ 25 сентября 20 ч 05 мин) и СКЛ 14–16 июля 2000 г. (УФ 15 июля 14 ч 18 мин).

Таблица 1.

Начало вспышки		Балл вспышки X- rays	Расположение вспышки	Поток протонов >10 МэВ протонов/(см ² ·с·ср)	Поток протонов > 60 МэВ протонов/(см ² ·с·ср)
Год	Дата/Время				
2000	8 ноября/22:42	M7.4	N05W78	$14.8 \cdot 10^3$	$9.0 \cdot 10^2$
2001	24 сентября/09:32	X2.6	S16E23	$12.9 \cdot 10^3$	$1.1 \cdot 10^2$
2000	14 июля/10:03	X5.7	N22W07	$24.0 \cdot 10^3$	$1.0 \cdot 10^3$

В таблицах 1 и 2 приведены характеристики вспышек и сопровождавших их корональных выбросов, соответственно, для всех трех рассматриваемых событий СКЛ.

Таблица 2.

Первое появление КВМ на С2 SOHO		Угловая ширина в градусах	Линейная скорость КВМ (км/сек)	Масса КВМ в граммах	Кинетическая энергия в эрг	Приход УФ КВМ Дата/Время	Скорость УФ КВМ (км/сек)
Год	Дата/Время						
2000	8 ноября/23:06	121	1738	$4.6 \cdot 10^{15}$	$8.6 \cdot 10^{29}$	10 ноября/06:01	920
2001	24 сентября/10:31	Гало	2402	$2.2 \cdot 10^{16}$	$6.5 \cdot 10^{32}$	25 сентября/20:05	850
2000	14 июля/10:54	Гало	1674	$1.4 \cdot 10^{16}$	$1.9 \cdot 10^{32}$	15 июля/14:18	845

Для события 24–26 сентября 2001 г. (см. рис. 2а), согласно данным GOES-10, в период до прихода УФ (25 сентября 16^h–19^h UT) $F_{p>60\text{МэВ}} \sim 10^2$ протонов/(см²·сек·ср), поэтому наблюдаются относительно небольшие по величине скачки интенсивности в спектрах энергии. Влияние УФ привело к усилению интегральных потоков протонов всех энергий, вплоть до >100 МэВ. Это повлияло, в том числе, и на значительный рост скачка интенсивности в спектрах энергий рассматриваемых элементов (рис. 2б, период 25 сентября 20^h–23^h UT). Основные изменения, конечно, связаны с радикально другим видом относительного содержания элементов в области малых энергий (< 2 МэВ/н).

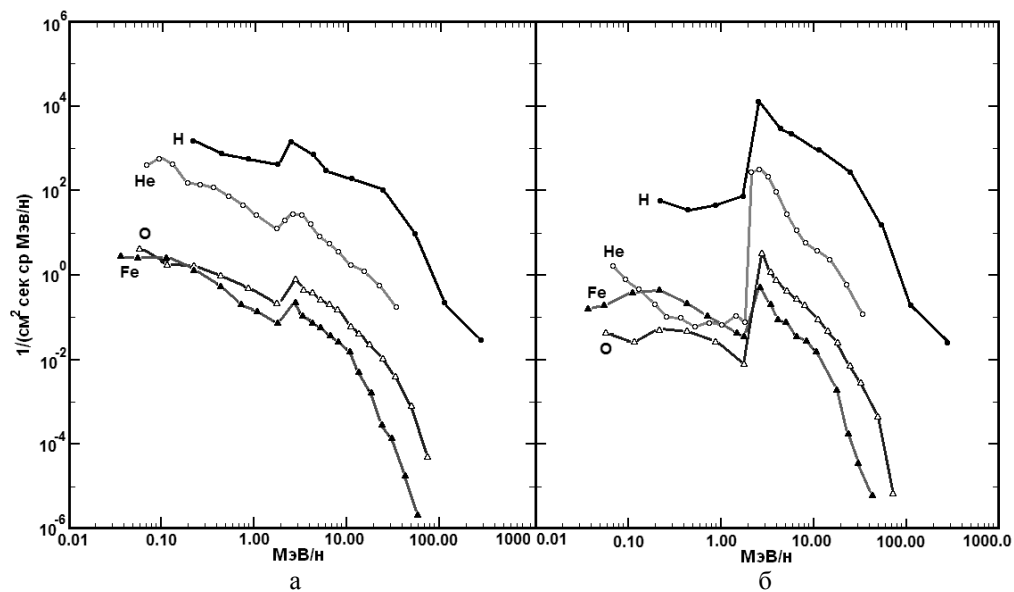


Рис. 2. Сопоставление спектров энергии H, He, O, Fe в периоды (а) до и (б) после прихода УФ коронального выброса для события СКЛ 24–26 сентября 2001 г.

Количественное содержание ионов малых энергий (0.1–1.5) МэВ/н всех элементов с приходом УФ показало понижение значений, причем ионы гелия имели гигантское ослабление – от одного до трех порядков. Интенсивность потока ионов Fe с энергиями (0.2–0.8) МэВ/н с приходом УФ изменилась в меньшей степени, поэтому содержание ионов железа превосходило на порядок ионы кислорода, а также в несколько раз даже количество ионов гелия.

Об особенностях изменений энергетических спектров ионов...

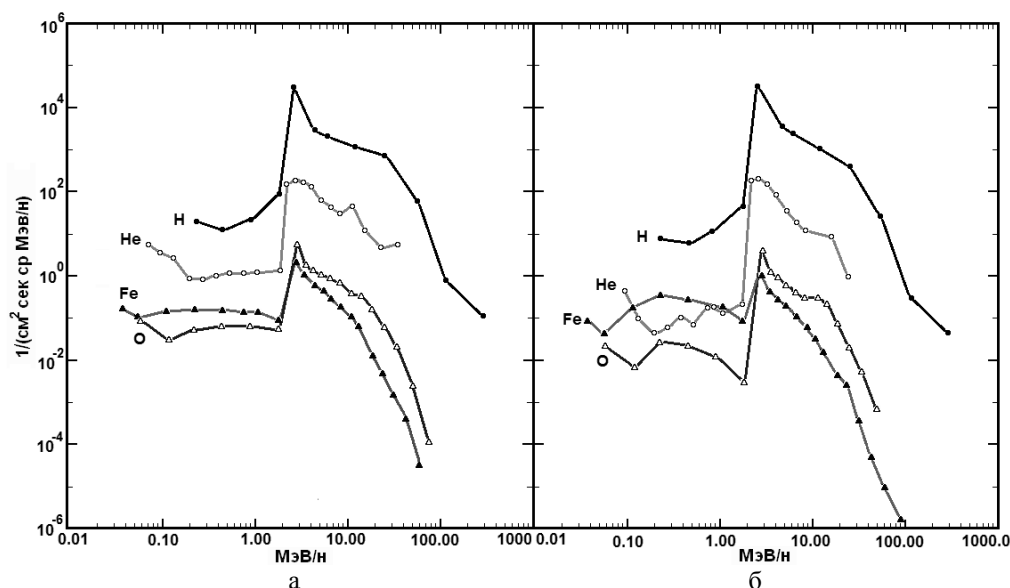


Рис. 3. Сопоставление спектров энергии H, He, O, Fe в периоды (а) до и (б) после прихода УФ коронального выброса для события СКЛ 14–16 июля 2000 г.

Примечательно, что для обоих событий наблюдается практически идентичная форма и значения спектров энергии в период после прихода УФ, а наиболее заметные изменения в спектрах происходят в интервалах малых энергий – (0.06–1.5) МэВ/н.

При меньшей интенсивности потоков протонов $F_{p>60 \text{ МэВ}} < 10^2$ протонов/(см²·сек·ср) приход фронтов ударных волн приводит лишь к небольшим изменениям формы спектров энергии ионов.

Заметим, что в мощных событиях СКЛ, когда спектры ускоренных частиц носят смешанный характер и определяются ускорительными процессами как в самой вспышке, так и в ударной волне от КВМ, весьма затруднительно выявить вклад каждого из основных процессов. В этой связи особую роль играет величина отношения Fe/O, являющаяся следствием FIP-эффекта. Так, например, Кейн и др. (2006) пришли к выводу, что двухкомпонентные явления СКЛ содержат популяции частиц, ускоренных вспышкой и обогащенных Fe ($\text{Fe/O} > 2$), и частиц, ускоренных ударной волной КВМ и обедненных Fe ($\text{Fe/O} < 1$). Кроме того, на основе изучения спектров частиц 54 больших явлений СКЛ в области энергий 2–15 МэВ/н Римс (2014) показал, что основной причиной временных и пространственных вариаций обилий тяжелых ионов в межпланетной среде является рассеяние энергичных частиц волнами альвеновской турбулентности. Турбулентность возбуждается потоками энергичных протонов, возможно, ускоренными ударной волной КВМ. Рассеяние зависит от магнитной жесткости частиц, поэтому ионы Fe рассеиваются волнами менее эффективно, чем ионы кислорода. Вследствие этого, ионы Fe при распространении опережают ионы O, что и приводит к регистрации отношения $\text{Fe/O} > 1$.

В недавно опубликованной работе (Дирксенс и др., 2015) был выполнен статистический анализ связей между характеристиками СКЛ и свойствами вспышек и КВМ. В частности, было получено, что корреляция между пиком потока протонов и скоростью КВМ уменьшается с энергией, в то время как с интенсивностью вспышек она показывает противоположное поведение. Кроме того, корреляция со скоростью КВМ сильнее, чем корреляция с интенсивностью вспышек при энергиях меньше 15 МэВ, и ослабевает при энергиях, превышающих 20 МэВ. Это является косвенным свидетельством того, что в области небольших энергий СКЛ возрастает

роль ускорения ударными волнами от КВМ. Таким образом, ускорение частиц ударными волнами от КВМ должно преобладать при низких энергиях частиц СКЛ, а ускорение, связанное со вспышками, может доминировать при высоких энергиях (Тротте и др., 2015).

3 Выводы

Явления СКЛ, в ходе развития которых потоки ускоренных частиц превосходят значение $F_{p>60 \text{ МэВ}} \geq 10^2$ протонов/(см²·сек·ср), демонстрируют “изломы” в профилях спектров энергий в виде резких скачков интенсивности в интервале энергий ионов 1.5–2.5 МэВ/н. Отметим, что в области более высоких энергий (> 2.5 МэВ/н) профили интенсивности потоков ионов различных элементов обладают “типичными” относительными значениями.

При резких изломах в спектрах энергии СКЛ приход фронтов ударных волн от корональных выбросов приводит к значительным изменениям относительных содержаний ионов при малых энергиях (0.06–1.5) МэВ/н во вспышечных потоках. Наблюдаются даже случаи количественного преобладания ионов железа над ионами гелия.

Литература

- Алтынцев А.Т., Банин В.Г., Куклин Г.В., Томозов В.М. // Солнечные вспышки. М.: Наука. 1982.
- Дирксенс и др. (Dierckxsens M., Tziotziou K., Dalla S., et al.) // *Solar Phys.* 2015. V. 290. P. 841.
- Кейн и др. (Cane H.V., Mewaldt R.A., Cohen C.M.S., et al.) // *Geophys. Res.* 2006. V. 111. A06S90.
- Клекер (Klecker B.) // 23rd European Cosmic Ray Symp. IOP Publishing. *Journal of Physics: Conf. Ser.* 2013. V. 409. P. 1.
- Мивальдт и др. (Mewaldt R.A., Looper M.D., Cohen C.M.S., et al.) // 29th International Cosmic Ray Conference. Pune. 2005. P. 101.
- Мивальдт и др. (Mewaldt R.A., Looper M.D., Haggerty D.L., et al.) // Presentation Second GLE Workshop. 2009. P. 22.
- Минасянц Г.С., Минасянц Т.М. // Труды XVIII Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца “Солнечная и солнечно-земная физика – 2014”. Пулковое. 2014. С. 287.
- Прист Э.Р., Форбс Т. // Магнитное пересоединение. Магнитогидродинамическая теория и приложения. М.: Физматлит. 2005.
- Римс (Reames D.V.) // *Rev. Geophys.* 1995. V. 33. Issue S1. P. 585.
- Римс и Нг (Reames D.V. and Ng C.K.) // *Astrophys. J.* 2010. V. 723. P. 1286.
- Римс (Reames D.V.) // *Solar Phys.* 2014. V. 289. P. 977.
- Сомов (Somov V.V.) // *Plasma Astrophysics: 1. Fundamentals and Practice.* Springer. 2012.
- Томозов В.М. // Солнечно-земная физика. 2012. Вып. 19. С. 19.
- Томозов В.М. // Солнечно-земная физика. 2013. Вып. 23. С. 23.
- Томозов В.М., Строкин Н.А. // Геомагнетизм и аэрономия. 2015. Т. 55. № 2. С. 161.
- Тротте и др. (Trottet G., Samwel S., Klein K-L., et al.) // *Solar Phys.* 2015. V. 290. P. 819.