

УДК 523.98

Исследование свойств потоков солнечных ускоренных частиц с помощью их энергетических спектров

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

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

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

Поступила в редакцию 1 октября 2016 г.

Аннотация. С помощью энергетических спектров ионов H, He, C, O и Fe исследуется развитие солнечных вспышечных потоков в широком интервале энергии (0.04–287.23) MeV/n с разрешением по времени 1 час. Использовались данные, полученные на различных космических аппаратах. Выявлено существование двух различных стадий в развитии вспышечных потоков: возмущенной и спокойной. Типичной формой энергетических спектров для возмущенной стадии является присутствие искажений в виде дугообразных изгибов. Спокойная стадия потоков характеризуется постепенным уменьшением количества вспышечных частиц со спектрами энергии в виде гладких кривых. Обнаружено несколько случаев присутствия резких изломов в спектрах энергии ионов в области энергии 1.5–2.5 MeV. Установлено, что такое поведение энергетических спектров связано с влиянием усиленных потоков протонов с энергиями > 60 MeV/n и интенсивностью более 10^2 p/(cm²s sr), ускоренных ударными волнами коронального выброса. С помощью энергетических спектров в семи интервалах энергии со средними значениями от 0.06 до 75.69 MeV/n определены отношения Fe/O для импульсных событий, явлений солнечных космических лучей и длительных потоков ускоренных частиц. На основе сравнения моделей разных процессов ускорения частиц, а также с учетом влияния FIP-эффекта, представлено качественное объяснение поведения Fe/O с энергией ионов рассмотренных классов событий.

INVESTIGATION OF PROPERTIES OF SOLAR ACCELERATED PARTICLE FLUXES USING ENERGY SPECTRA, by G.S. Minasyants, T.M. Minasyants, V.M. Tomozov. The development of solar flare fluxes over a wide range of energies (0.04–287.23) MeV/n with a time resolution of 1 hour is studied using the energy spectra of H, He, C, O and Fe ions. The data obtained by various spacecrafts were used. Two various stages in the development of fluxes are revealed: perturbed and quiet. The typical form of energy spectra for the perturbed stage is characterized by the presence of distortions in the form of arc bends. The quiet stage of fluxes is characterized by gradual reduction in the amount of flare particles which have energy spectra described by smooth curves. A few cases of presence of sharp bends in ion energy spectra in the range of energies 1.5–2.5 MeV were found. It is established that such a behavior of energy spectra is related to influence of increased fluxes of protons with energies > 60 MeV and intensity more than 10^2 p/(cm² s sr), accelerated by shock waves of coronal mass ejections. Using energy spectra in seven energy intervals with average values in the range from 0.06 to 75.69 MeV/n there were determined Fe/O ratios for impulse events, the phenomena of solar

cosmic rays and the long lasting fluxes of accelerated particles. From the comparison of models for different processes of particles' acceleration, taking into account the influence of FIP-effect, we present the qualitative explanation of behavior of the Fe/O ratio with energies of ions of the considered classes of events.

Ключевые слова: Солнце, спектры энергии ускоренных частиц, FIP-эффект

1 Введение

Наиболее значительные события солнечных высокоэнергичных частиц возникают при совместном действии вспышечного ускорения в процессе магнитного пересоединения, а также при возникновении и движении коронального выброса массы (КВМ), сопутствующего развитию вспышки. Важной характеристикой вспышечных потоков ускоренных частиц является поведение их энергетических спектров. Изучение формы энергетических спектров позволяет получить информацию о процессах ускорения частиц и дальнейшем их распространении от Солнца к Земле. Этому и будет посвящена настоящая работа.

2 Анализ наблюдательных данных и их обсуждение

Обычно для анализа используют спектры энергий ионов, построенные для всего периода существования усиленного вспышечного потока частиц по значениям интенсивности потоков в отдельных энергетических интервалах, что позволяет получить лишь усредненную картину по всему времени существования потока частиц. С целью получить более детальную картину развития потока, его структурные свойства, мы использовали спектры энергии с разрешением по времени 1 час для мощных вспышечных событий. При построении спектров энергии частиц H, He, O, Fe использовались наиболее надежные значения потоков элементов в широком диапазоне энергий, полученных на различных космических аппаратах (КА). При расчете спектров энергии приняты надежные данные о потоках частиц и ионов в разных интервалах энергии: ACE ULEIS для H, He, O, Fe при энергии $E_k < 2$ MeV/n; IMP8 GME для H при $E_k = (2-4)$ MeV/n; GOES H для $E_k > 4$ MeV/n; ACE SIS He, O, Fe при $E_k > 10$ MeV/n; WIND EPACT/LEMT He, O, Fe в интервале (2–10) MeV/n. Таким образом, был использован широкий интервал энергий (0.04–287.23) MeV/n.

Спектры энергии для потоков H, He, O, Fe получены с помощью опции “Multi-source spectral plots of energetic particle fluxes” на сайте “OMNIWeb Plus Browser”. Значения энергии частиц и ионов выражены в MeV/nuc и соответственно потоки – в particles/(cm² s sr MeV/nuc).

Проведенное нами исследование (Минасянц, Минасянц, 2014) показало, что по виду спектров энергии в развитии вспышечных потоков можно выделить две основные фазы – возмущенную и спокойную. Эти фазы отличаются в первую очередь степенью гладкости кривых: возмущенная стадия характеризуется сильными изгибами, спокойная – довольно гладкими кривыми. Переход от возмущенной стадии к спокойной происходит в моменты окончания вспышечного усиления частиц разных энергий. Спокойная стадия характеризуется постепенным уменьшением количества вспышечных частиц до фоновых значений.

На рис. 1 показано развитие вспышечного процесса 8–12 ноября 2000 г., в том числе и в период возмущенной стадии потока (рис. 1а).

Развитие энергичного потока частиц, при его регистрации на КА вблизи Земли, начинается с нарастания потока частиц наиболее высоких энергий. Со временем область усиления постепенно смещается в сторону меньших энергий. Спектры энергии имеют при этом вид выпуклых холмов или изгибов. Самая заметная особенность в спектрах H и He при $E_k < 1$ MeV/n для

Исследование свойств потоков солнечных ускоренных частиц...

начального этапа развития потока энергичных частиц (рис. 1а) – это ослабление примерно на 1–2 порядка величины значений потока относительно предвспышечного состояния. Что касается интервала $E_k \sim 10$ MeV/n, то наблюдается обратная картина – поток частиц усилен более чем на порядок. В итоге значения потоков H и He при $E_k \sim 1$ MeV/n примерно в 100 раз меньше соответствующих значений при $E_k \sim 10$ MeV/n. Вообще вид кривых спектров энергии в этот период настолько сильно искажен и деформирован, что отсутствует возможность их удовлетворительной аппроксимации относительно простой функцией. Это также связано с наблюдаемым проявлением еще одного эффекта – внезапным, резким скачком значений потока в районе 1.5–2.5 MeV. Найдена закономерность: в тех случаях, когда интенсивность интегрального потока протонов $F_{p>60\text{MeV}} > 10^2$ (particles/cm² sec sr), в спектрах всегда присутствуют изломы в виде резких скачков значений потоков для всех элементов. В течение периода 23-го цикла активности наблюдалось всего 11 подобных энергичных событий.

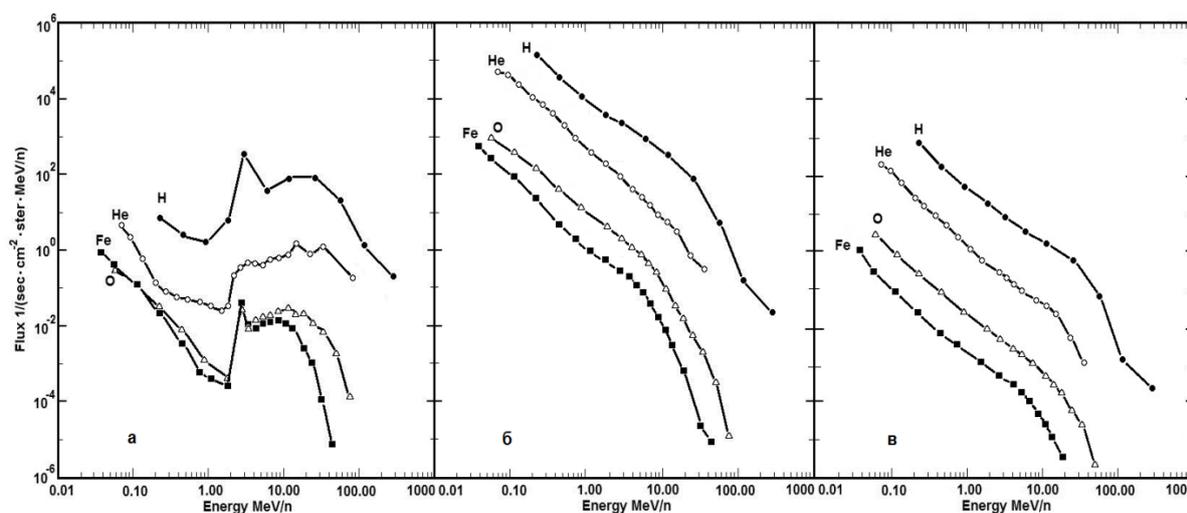


Рис. 1. Спектры энергии потоков H, He, O, Fe события 8–11 ноября 2000 г. а – спектры энергии начала вспышечного потока 9 ноября 0–1^h UT; б – конец возмущенной стадии потока 10 ноября 6^h UT; в – спектры энергии солнечного ветра после окончания вспышечного потока 12 ноября 0–1^h UT

На рисунке 1б приведены спектры энергии рассматриваемых элементов за 10 ноября 2000 г. в 6h UT. Этот момент относится к окончанию возмущенной стадии развития вспышечного потока, когда уже прибыли ускоренные частицы во всем интервале указанных энергий, от сотен MeV до сотых долей MeV. В это время величина потоков имеет наибольшие значения для всего вспышечного события, что подтверждается почасовым сканированием спектров энергии. С завершением возмущенной стадии потока спектры приобретают довольно гладкий и стандартный вид, при котором значения потоков частиц меньших энергий превышают значения потоков частиц с большими энергиями. В дальнейшем, в спокойной стадии потока происходит постепенное уменьшение значений спектров энергии и в завершении процесса (рис. 1в) наблюдается картина послевспышечного неактивного состояния солнечного ветра. Аналогичную структуру и подобные свойства показывают потоки высокоэнергичных частиц и в других мощных событиях.

С помощью энергетических спектров получены количественные оценки относительного содержания Fe/O в различных интервалах энергии в периоды возмущенной стадии развития длительных вспышечных потоков, а также импульсных событий. Подчеркнем, что отношение Fe/O является мерой проявления FIP-эффекта, поскольку Fe относится к элементам с низким первым потенциалом ионизации ($FIP < 10$ eV), содержание которых в верхней атмосфере Солнца по-

вышено. В то же время содержание кислорода остается близким к фотосферному обилию, поскольку его потенциал ионизации превышает 10 eV (Томозов, 2012). В многочисленных предыдущих работах приводятся результаты определений отношения Fe/O для различных вспышечных потоков частиц обычно в одном или двух интервалах энергии, что явно недостаточно для поиска зависимости значений Fe/O от энергии ионов. Поэтому при построении энергетических спектров использовалось 7 интервалов энергии, имеющих средние значения: 0.06 MeV/n, 0.23 MeV/n, 1.81 MeV/n, 5.30 MeV/n, 13.00 MeV/n, 30.90 MeV/n и 75.69 MeV/n.

В классе длительных событий отдельно рассматривались события солнечных космических лучей, возрастания релятивистских протонов, в которых регистрировались на станциях сети нейтронных мониторов – GLE (Ground Level Enhancement). Всего определены значения Fe/O в периоды развития возмущенной стадии 16-ти таких событий, возникших в течение 23-го цикла солнечной активности. Специально для сравнения с событиями GLE нами было отобрано 16 других событий большой длительности (Gradual Large Events). Эти мощные события были взяты из списка “The Top 30 SEP Events of Solar Cycle 23” (<http://www.srl.caltech.edu/sampex/DataCenter/DATA/EventSpectra/>), составленного на основе данных наблюдений на КА GOES потоков протонов с энергиями > 30 MeV. Значения отношения Fe/O определены в тех же семи участках энергии в периоды возмущенной стадии потоков постепенных событий (рис. 2).

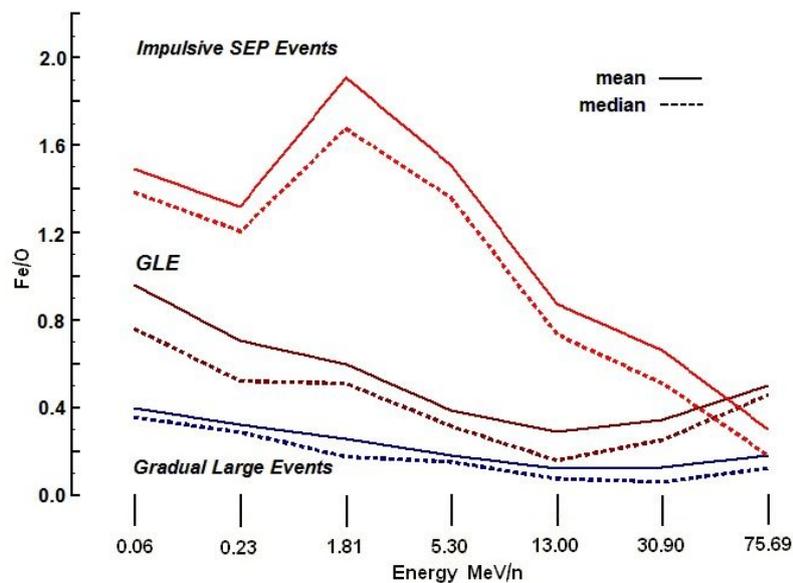


Рис. 2. Сопоставление хода значений Fe/O с энергией для импульсных, GLE и мощных длительных событий

Из списка импульсных событий (Impulsive SEP Events), представленного в работе (Нитта и др., 2006), для анализа были использованы 37 вспышек с рентгеновскими баллами > C1, у которых в составе потоков частиц значения Fe/O превышали величину 0.5 при энергии 2–3 MeV/n. Природа образования этих импульсных потоков связана в основном с действием ускорения частиц непосредственно в области вспышек. Это подтверждается тем, что среди корональных выбросов, сопровождавших импульсные вспышки, отсутствовали Halo, а также фронты ударных волн при наблюдениях вблизи Земли. Таким образом, с учетом возможности дополнительного ускорения ударными волнами, эти выбросы являлись недостаточно эффективными уско-

Исследование свойств потоков солнечных ускоренных частиц...

рителями. На рис. 2 представлены средние значения Fe/O для 37 импульсных событий в аналогичных семи участках энергии.

При изменении характеристик потоков частиц от вспышки к вспышке отмечен систематический тренд значений Fe/O в зависимости от энергий ионов. Ход значений Fe/O для потоков GLE и других длительных событий имеет как количественные, так и качественные отличия. Наиболее характерные отличия в поведении средних значений величины Fe/O для GLE и мощных длительных событий были отмечены в интервалах энергий со средними значениями: 13.0 и 75.69 MeV/n. При сопоставлении значений Fe/O для каждого из рассмотренных событий (GLE и мощных длительных явлений) в интервалах энергий 10.7–15 и 63.8–89.9 MeV/n выяснилось, что в большинстве таких событий значения Fe/O при изменении энергии остаются практически постоянными. Остальные явления демонстрируют как увеличение, так и уменьшение значений Fe/O. Около 88 % событий GLE имеют более высокие значения Fe/O, причем у половины событий GLE Fe/O принимают повышенные значения: от 0.58 до 0.97 при энергии 75.69 MeV/n. Эти отличительные особенности поведения Fe/O во вспышечных потоках GLE указывают на их принадлежность к отдельному подклассу длительных событий.

Отметим, что обработка спектров энергии при интегрировании по всему вспышечному потоку длительных событий приводит к существенному занижению значений Fe/O, особенно в области небольших энергий ионов < 2 MeV/n.

Длительные вспышечные события с ускорением ударными волнами происходят в сложных магнитных структурах, содержащих волокно магнитного потока, располагающееся над линией раздела полярностей поля в фотосфере. Нужно заметить, что в мощных событиях небольшая часть ускоренных вспышкой частиц может проникнуть в область выброса KBM и испытать дополнительное ускорение ударной волной, тогда спектры ускоренных частиц будут носить смешанный характер. В этой связи особую роль играет величина Fe/O, которая является следствием FIP-эффекта, поскольку популяция частиц, ускоренных вспышкой, сильно обогащена Fe ($Fe/O > 2$). Ускоренные ударными волнами KBM частицы, напротив, обеднены Fe ($Fe/O < 1$) (Кейн и др., 2006).

В работе (Нитта и др., 2006), посвященной солнечным источникам импульсных событий и выявлению их магнитных связей с Землей, авторы попытались определить области источников 117 явлений по наблюдениям в области энергий 2–3 MeV/n. Следует подчеркнуть, что в 80 % областей источников вблизи них были обнаружены структуры с открытым магнитным полем. Отсюда следует, что пик величины Fe/O на графике зависимости от энергии (рис. 2) обусловлен ионами Fe, ускоренными в области самой импульсной вспышки. Принципиально важным для этого является наличие магнитных структур с открытыми линиями поля, выходящими в межпланетную среду (например, корональных дыр) по соседству со вспышечноактивными областями. Процессом, обеспечивающим ускорение ионов и их выход в межпланетную среду, является “обменное” пересоединение магнитных полей на границе раздела между замкнутым и открытым магнитными полями в хромосфере, где могут накапливаться ионы Fe с низким первым потенциалом ионизации (Лэминг, 2004).

3 Выводы

Таким образом, из представленных на рис. 2 закономерностей распределений величины Fe/O в длительных и импульсных явлениях, а также из существующих модельных представлений можно сделать следующие выводы.

Наиболее отчетливое влияние FIP-эффекта (максимальные значения отношения Fe/O) проявляется в импульсных вспышечных событиях для ионов с энергиями < 2 MeV/n (рис. 2). Это может быть связано с первоначальным накоплением элементов с низким первым потенциалом ионизации (например, Fe) в активных областях с последующим их освобождением в результате обменного пересоединения с линиями открытого поля соседних корональных дыр и с последую-

ющим выходом энергичных частиц непосредственно в межпланетную среду (Ванг и др., 2006). В области спектра ионов с более высокими энергиями проявление FIP-эффекта ослабевает и величины Fe/O демонстрируют быстрое уменьшение. Максимум величины Fe/O в области энергий 0.2–5 MeV/n (рис. 2) может быть обусловлен дополнительным ускорением ионов в выбросах из области магнитного пересоединения вспышки.

В длительных событиях величина Fe/O плавно спадает с энергией ионов с небольшим подъемом в области высоких энергий (> 30 MeV/n) (рис. 2), а наибольшие значения Fe/O достигаются в области сравнительно небольших энергий.

Работа выполнена согласно научному плану по программе №0073/ПЦФ-15-МОН.

Литература

- Ванг и др. (Wang Y.-M, Pick M., Mason G.M.) // *Astrophys. J.* 2006. V. 639. P. 495.
- Кейн и др. (Cane H.V., Mewaldt R.A., Cohen C.M.S., von Rosenvinge T.T.) // *Geophys. Res.* 2006. V. 111. A06S90.
- Лэминг (Laming J.M.) // *Astrophys. J.* 2004. V. 614. P. 1063.
- Минасянц Г.С., Минасянц Т.М. // Труды XVIII Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца “Солнечная и солнечно-земная физика – 2014”. Пулковое. 2014. С. 287.
- Нитта и др. (Nitta N.V., Reames D.V., De Rosa M.L., Liu Y.) // *Astrophys. J.* 2006. V. 650. P. 438.
- Томозов В.М. // Солнечно-земная физика. 2012. Вып. 19. С. 19.