

УДК 523.98

Физические условия в солнечном ветре и изменения значений Fe/O с энергией ионов в периоды минимума активности цикла

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. Проанализированы источники энергичных частиц различной природы, которые определяют физические условия в солнечном ветре в период минимума солнечной активности. На основе информации о поведении отношения Fe/O в различных интервалах энергий ионов определено влияние галактических космических лучей и их аномальной компоненты на физические условия в солнечном ветре. Объяснены минимальные значения отношения Fe/O при низких энергиях (2–30 МэВ/н) влиянием аномальной компоненты космических лучей. Влияние этой компоненты приводит к возрастающей интенсивности потоков ионов с высоким первым потенциалом ионизации – FIP (H, He, N, O); с другой стороны, элементы с низким потенциалом FIP (C, Mg, Si, Fe) показывают пониженные величины потоков. В области высоких энергий ($E_k > 30$ МэВ/н) рост отношения Fe/O связан с определенным влиянием галактических космических лучей на характеристики солнечного ветра в условиях низкой солнечной активности.

PHYSICAL CONDITIONS IN THE SOLAR WIND AND VARIATIONS OF THE FE/O RATIO VERSUS THE ION ENERGY DURING THE PERIODS OF LOW SOLAR CYCLE ACTIVITY, *by G.S. Minasyants, T.M. Minasyants, V.M. Tomozov.* We analyze sources of energetic particles of different origin that define physical conditions in the solar wind during the solar activity minimum. On the basis of information on the behavior of the Fe/O ratio in different intervals of ion energy, the impact of the galactic cosmic rays and their abnormal component on physical conditions in the solar wind is determined. The minimum values of the Fe/O ratio at low energies (2–30) MeV/n are explained as an influence of anomalous component of cosmic rays. The influence of this component leads to increased intensity of ion fluxes with high first ionization potential – FIP (H, He, N, O); on the other hand, the elements of low FIP (C, Mg, Si, Fe) show reduced fluxes. For higher energy region ($E_k > 30$ MeV/n), the increase in the Fe/O ratio is related to the decisive influence of galactic cosmic rays on properties of the solar wind in the conditions of low solar activity.

Ключевые слова: Солнце, спектры энергий солнечных космических лучей, FIP-эффект

1 Введение

В предыдущих работах (Кейн и др., 2006; Томозов, 2012) было показано, что для изучения физических процессов в плазме гелиосферы весьма эффективным является использование отношения примесных элементов Fe/O как меры проявления FIP-эффекта (First Ionization Potential). Железо относится к элементам с низким первым потенциалом ионизации ($FIP < 10$ эВ), обилия которых в верхней атмосфере Солнца повышены в несколько раз вследствие действия пондеромоторной силы альвеновских волн на ионы железа (Лэмминг, 2004). В то же время содержание кислорода остается близким к фотосферному обилию, поскольку его потенциал ионизации превышает 10 эВ, он дольше остается в нейтральном состоянии и не подвергается воздействию альвеновских волн. Однако, как правило, результаты определений отношения Fe/O относятся лишь к одному или двум энергетическим интервалам, что явно недостаточно для определения зависимости Fe/O от энергий ионов. В связи с этим особенное значение приобретает информация об отношении Fe/O в различных интервалах энергий ионов, которое является индикатором физического состояния среды гелиосферы.

Известно, что в относительном содержании примесных химических элементов в солнечном ветре также наблюдаются изменения, связанные с фазой солнечного цикла и вспышечной активностью Солнца. Вариации состава этих элементов определяются двумя основными факторами – генерацией энергичных частиц на Солнце и условиями их распространения в межпланетной среде, а также приходом галактических космических лучей (ГКЛ) в гелиосферу. Основными причинами, влияющими на изменение условий распространения малоэнергичной части ГКЛ (а также ионов солнечного происхождения), является количество и характер распределения магнитных неоднородностей, а также флуктуации магнитного поля в гелиосфере Солнца. Отсутствие активных областей на Солнце приводит к минимизации источников рассеяния ГКЛ и, соответственно, к усилению влияния ГКЛ, начиная с энергий ионов $E_k > 2-5$ МэВ/н (Гаррард и др., 1997). Таким образом, физические условия в солнечном ветре в эпоху минимума цикла солнечной активности можно описать тремя характерными состояниями, связанными с энергиями частиц. По мере роста энергий ионов значения Fe/O могут последовательно характеризоваться: а) преобладающим влиянием Солнца $E_k < 2$ МэВ/н, б) совместным воздействием Солнца и ГКЛ $E_k = (2-30)$ МэВ/н и, наконец, в) влиянием самих ГКЛ $E_k > 30$ МэВ/н.

В 1973 г. был открыт новый вид космических лучей – аномальная компонента космических лучей (АКЛ) (Гарсия-Маноз и др., 1973). В отличие от ГКЛ, представляющих ядра различных элементов, АКЛ состоят из частично ионизованных атомов с высоким первым потенциалом ионизации (He, N, O, Ne, Ar) (Базилевская, Стожков, 2008). Наиболее обоснованная теория происхождения АКЛ была предложена в работе (Фиск и др., 1974). Частицы АКЛ образуются при проникновении в гелиосферу нейтральных атомов из межзвездной среды с высоким FIP (H, He, N, O и Ne), которые ионизируются при обмене зарядами с протонами солнечного ветра или под действием ультрафиолетового излучения Солнца и “захватываются” солнечным ветром (Римс, 2001). Однако степень ионизации этих ионов не превышает $Q = 2+$, а энергия составляет несколько кэВ на нуклон. При приближении к Солнцу они выносятся в потоке солнечного ветра наружу и, достигнув границы гелиосферы, ускоряются на пограничной ударной волне (механизм Ферми) до энергий ~ 10 МэВ/н. Затем они могут вновь вернуться к Солнцу. Доказано, что этот процесс может повторяться неоднократно. Отметим, что ионы элементов с низким FIP ионизируются уже в локальной межзвездной среде и не способны проникать внутрь гелиосферы (Римс, 2001).

Таким образом, целью настоящей работы является определение поведения величины Fe/O в возможно более широком интервале энергий ионов в межпланетной среде в условиях минимальной солнечной активности и выяснение возможного вклада АКЛ в проявления FIP-эффекта в гелиосфере.

2 Анализ данных наблюдений и обсуждение результатов

Продолжительный минимум 23-го цикла активности дал возможность в течение длительного интервала времени проследить за вариациями потоков различных химических элементов в спокойном солнечном ветре. За всю историю регулярных наблюдений Солнца с 1700 года лишь 11-й и 14-й циклы активности в стадии минимума имели более низкие значения чисел Вольфа. Декабрь 2008 года был определен как минимум предыдущего цикла активности. Поэтому для исследования состояния состава элементов солнечного ветра в спокойных условиях на Солнце был выбран промежуток с 1 апреля 2007 по 31 декабря 2009 гг. В этот период в течение 669 дней на Солнце вообще отсутствовали активные области, а в остальные дни существовали лишь пятна и поры с очень небольшими площадями, которые не привели к появлению заметных возмущений в солнечном ветре.

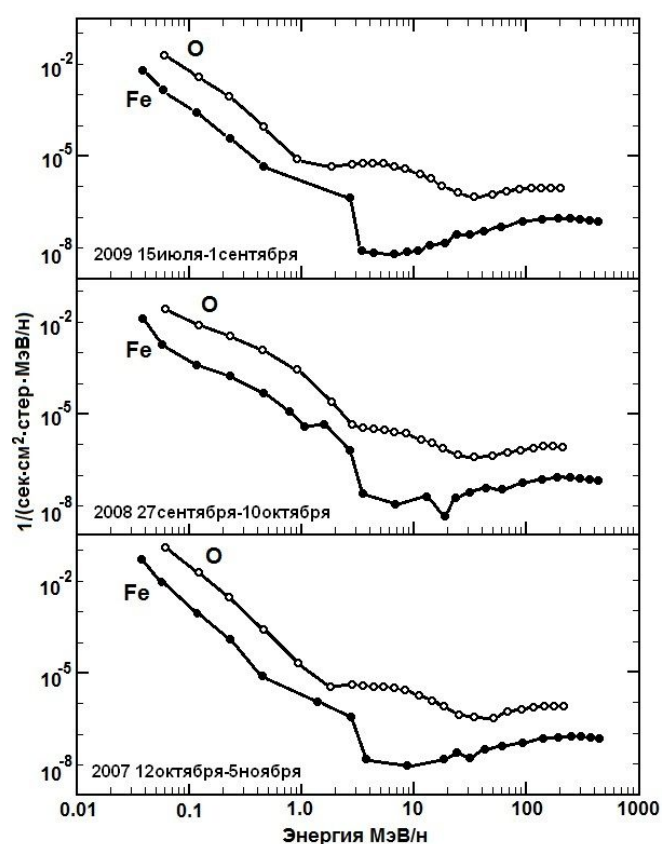


Рис. 1. Спектры энергий ионов кислорода и железа в солнечном ветре в интервалы времени с полным отсутствием активных областей на Солнце

Для трех временных интервалов с полным отсутствием пятен в разные годы минимума цикла были построены спектры энергий ионов O и Fe (рис. 1). Причем начала интервалов времени сдвигались на трое суток вперед, чтобы получить параметры для спокойного солнечного ветра. Были использованы данные наблюдений Солнца на ИСЗ ACE (приборы ULEIS, EPAM, SIS, CRIS), WIND (EPACT/LEMT), STEREO (LET, HET). Общий интервал энергии для частиц и ионов составлял (0.06–500) МэВ/н. Выбрано 8 интервалов энергии, имеющих средние значе-

ния: 0.06 МэВ/н, 0.23 МэВ/н, 1.81 МэВ/н, 5.30 МэВ/н, 13.00 МэВ/н, 30.90 МэВ/н, 75.69 МэВ/н и 190.53 МэВ/н.

Спектры энергии ионов O и Fe в потоках частиц были получены с помощью опции “Multi-source spectral plots of energetic particle fluxes” на сайте “OMNI Web Plus Browser”. Значения энергии ионов выражены в МэВ/н и, соответственно, потоки — в частицах/(сек · см² · стер · МэВ/н) (ось ординат на рис. 1).

Рассчитанные и представленные на рисунке 1 спектры энергий ионов Fe и O для солнечного ветра при полном отсутствии пятен на Солнце обладают некоторыми особенностями. Обычно гладкие профили спектров Fe в наших случаях имеют довольно существенный провал значений в диапазоне энергии ~ 2–30 МэВ/н. Профили же спектров ионов O, напротив, не показывают спада и даже демонстрируют слабое усиление.

В результате многократного действия механизма ускорения частиц АКЛ в пограничной ударной волне в гелиосфере наблюдается увеличение интенсивностей потоков ионов с высоким FIP, в том числе и ионов кислорода. Элементы с низким значением FIP не показывают подобного роста интенсивностей потоков частиц (это относится к ионам C, Mg, Si, Fe).

С использованием значений потоков ионов Fe и O было рассчитано их относительное содержание в солнечном ветре для 8-ми интервалов энергии в период минимума цикла активности при полном отсутствии пятен (таблица 1).

Таблица 1.

Периоды отсутствия пятен	<i>Fe/O</i>							
	0.06 МэВ/н	0.23 МэВ/н	1.81 МэВ/н	5.30 МэВ/н	13.00 МэВ/н	30.90 МэВ/н	75.69 МэВ/н	190.53 МэВ/н
12.10-05.11 2007	0.076	0.052	0.188	0.005	0.009	0.040	0.087	0.097
27.09-10.10 2008	0.079	0.055	0.109	0.007	0.016	0.072	0.093	0.107
15.07-01.09 2009	0.075	0.045	0.152	0.001	0.005	0.048	0.086	0.099
Среднее	0.077± 0.001	0.051± 0.003	0.150± 0.023	0.004± 0.002	0.010± 0.003	0.053± 0.010	0.089± 0.002	0.101± 0.003

Таким образом, с учетом влияния АКЛ, становится понятной причина существования низких, минимальных величин Fe/O = 0.004 и 0.010 при значениях энергии E_к = 5.3 и 13.0 МэВ/н соответственно. Подчеркнем, что при появлении активных областей на Солнце ход спектров энергии для всех элементов становится подобным и показывает непрерывное быстрое падение потоков ионов, особенно при энергиях ионов в сотни МэВ/н.

На рисунке 2 для сравнения приведены полученные кривые изменения отношения Fe/O в потоках частиц солнечного ветра для спокойных условий (без пятен) и в период обычной активности Солнца при развитии импульсных вспышечных событий (Минасянц и др., 2016) в разных интервалах энергии ионов. Применение спектров энергий ионов железа и кислорода позволило использовать довольно широкий интервал энергий при расчете их относительных содержаний.

В импульсных вспышечных событиях во время активного Солнца и в спокойных условиях при минимальной активности в солнечном ветре наблюдаются заметные вариации значений Fe/O с изменением энергии ионов. Отмечается тенденция к существенному превышению значений Fe/O во вспышечных энергичных потоках над значениями Fe/O в солнечном ветре при спокойных условиях при E_к < 30 МэВ/н, причем при более высоких энергиях ионов это превышение становится существенно меньшим. Кривые изменения отношения Fe/O для импульсных вспышечных событий и солнечного ветра в условиях минимальной активности показывают по-

Физические условия в солнечном ветре...

добный ход в интервале малых энергий ионов: 0.06–2.00 МэВ/н. При значении энергии $E_k = 1.81$ МэВ/н на обеих кривых наблюдаются максимальные значения Fe/O.

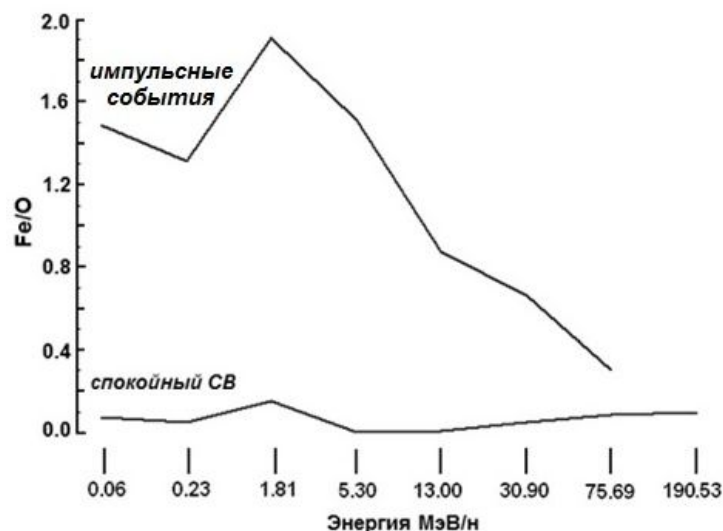


Рис. 2. Изменения относительного содержания Fe/O в солнечном ветре в спокойных условиях минимума активности и в потоках частиц при развитии импульсных вспышечных событий в разных интервалах энергии

3 Выводы

В плазме спокойного ветра при отсутствии пятен в интервале энергий (2–30) МэВ/н может проявляться вклад аномальной компоненты космических лучей. В этих условиях возможно проявление интересного эффекта: содержание ионов элементов с более высоким первым потенциалом ионизации (H, He, N, O) может превышать содержание ионов с более низким потенциалом ионизации (C, Mg, Si, Fe). Это приводит к самым низким значениям отношения $Fe/O = 0.004$ и 0.010 в спокойном солнечном ветре в интервале энергий ионов $E_k = (5.3–13.0)$ МэВ/н.

При сопоставлении спектров энергий ионов в спокойном ветре при отсутствии пятен на Солнце и от импульсных вспышек выяснено, что на обеих кривых отмечаются максимальные значения отношения Fe/O при энергии $E_k = 1.81$ МэВ/н. Несмотря на разницу в абсолютных значениях величины Fe/O в импульсных вспышках во время обычной активности и в спокойных условиях на Солнце происходят процессы, которые приводят к относительному возрастанию содержаний ионов железа по отношению к ионам кислорода в солнечном ветре.

Работа выполнена в рамках научного плана по программе № 0073/ПЦФ-15-МОН.

Литература

- Базилевская Г.А., Стожков Ю.И. // Плазменная гелиогеофизика. / Ред. Зеленый Л.М., Веселовский И.С. Сборник в 2-х томах. Т. 1. 2008. С. 345.
- Гаррард и др. (Garrard T.L. et al.) // Proc. 25th ICRC. 1997. V. 1. P. 105.
- Гарсия-Маноз и др. (Garcia-Munoz M., Mason G.M., Simpson J.A.) // Proc. 13th ICRC. 1973. V. 2. P. 1304.
- Кейн и др. (Cane H.V., Mewaldt R.A., Cohen C.M.S., von Roseninge T.T.) // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. N. 6. A06S90.

Лэминг (Laming J.M.) // *Astrophys. J.* 2004. V. 614. P. 1063.

Минасянц Г.С., Минасянц Т.М., Томозов В.М. // *Геомагнетизм и аэрономия.* 2016. Т. 56. № 6. С. 3.

Римс (Reames D.E.) // *Solar and galactic composition: A Joint SOHO/ACE Workshop. AIP Conf. Proc.* 2001. V. 598. P. 153.

Томозов В.М. // *Солнечно-земная физика.* 2012. Вып. 19. С. 19.

Фиск и др. (Fisk L.A., Kozlovsky B., Ramaty R.) // *Astrophys. J. Lett.* 1974. V. 190. P. 35.