

NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES

ISSN 1991-346X

Volume 5, Number 309 (2016), 81 – 85

G.S. Minasyants, T.M. MinasyantsFesenkov Astrophysical Institute, Almaty, Kazakhstan
gennadii_minasya@mail.ru**V.M. Tomozov**Institute of Solar-Terrestrial Physics, Irkutsk, Russia
tom@iszf.irk.ru**VARIATIONS OF Fe/O RATIO WITH ION'S ENERGIES
IN THE SOLAR ACTIVITY MINIMUM.****I. ENERGY SPECTRA OF FE AND O IONS ON THE SPOTLESS SUN**

Abstract. Energy spectra of iron and oxygen ions for period of minimum of the 23-rd activity cycle for three long-term time intervals when no sunspots were observed are constructed. Observational data from spacecrafts ACE, STEREO and WIND have been used. For eight separate ranges of energy started from 0.06 up to 190.53 MeV/n the ratio Fe/O in quiet solar wind were determined. The knowledge of ratio Fe/O for different intervals of energy of ions allows one to use it much more efficiently as the indicator of the physical conditions of the medium.

The behavior of curves of energy spectra of iron and oxygen ions indicates notable differences in energy region from 2-5 to 30 MeV/n where significant drop of Fe ions flux is observed whilst flux of O ions stays almost the same. It leads to minimum and lowest values of Fe/O ratio (0.004-0.010) in this interval of ions energies.

Comparison of values of Fe/O ratio for impulse flares events and for solar wind for conditions of the minimum of activity shows similar trend in an interval of small ions energies: 0.06-2.00 MeV/n. Moreover, both curves for energy $E_k=1.81$ MeV/n have maximal values of Fe/O. It indicates that despite of difference in absolute values of Fe/O, in impulse flares and in solar wind during minimum of activity, there are processes which lead to relative enhancement of the quantity of ions of iron in relation to ions of oxygen.

Keywords: solar activity minimum, energy spectra of ions, Fe/O ratio.

УДК 523.62

Г.С. Минасянц, Т.М. Минасянц

Астрофизический институт им. В.Г.Фесенкова, Алматы, Казахстан

В.М. Томозов

Институт солнечно-земной физики, Иркутск, Россия

**ИЗМЕНЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ Fe/O С ЭНЕРГИЕЙ ИОНОВ
В МИНИМУМЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ.****I. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ ИОНОВ Fe и O
ПРИ ОТСУТСТВИИ ПЯТЕН НА СОЛНЦЕ**

Аннотация. В период минимума 23-го цикла активности для трех продолжительных интервалов отсутствия пятен на Солнце построены энергетические спектры ионов железа и кислорода. Использовались данные наблюдений с космических аппаратов ACE, STEREO, WIND. Для восьми отдельных участков энергии от 0.06 до 190.53 МэВ/н рассчитаны значения отношения Fe/O в спокойном солнечном ветре.

Знание отношения Fe/O в различных интервалах энергии ионов позволяет значительно эффективнее использовать его как индикатор физического состояния среды.

Ход кривых энергетических спектров железа и кислорода показывает существенные различия в интервале энергии от 2-5 до 30 МэВ/н – наблюдается значительное падение потока ионов железа, при почти неизменных значениях для кислорода. Это приводит к минимальным и абсолютно низким значениям Fe/O = (0.004-0.010) в этом интервале энергий.

Сравнение значений отношения Fe/O для импульсных вспышечных событий и солнечного ветра в условиях минимальной активности показывают подобный ход в интервале малых энергий ионов: 0.06-2.00 MeV/n. Причем, при энергии $E_k=1.81$ MeV/n на обеих кривых наблюдаются максимальные значения Fe/O. Это указывает на то, что несмотря на разницу в абсолютных значениях Fe/O, в импульсных вспышках и в солнечном ветре во время минимальной активности, есть процессы, которые приводят к относительному повышению количества ионов железа по отношению к ионам кислорода.

Ключевые слова: минимум солнечной активности, энергетические спектры ионов, отношение Fe/O.

Наиболее мощные процессы активности на Солнце связаны с существованием групп солнечных пятен, связанных между собой магнитным полем в форме петель различных масштабов, которые являются основными блоками структур активных областей. Активная область занимает некоторую часть солнечной атмосферы, где плотность магнитной энергии значительно превосходит ее значения в окружающей невозмущенной атмосфере. В процессе развития активной области происходит усложнение топологии ее магнитных полей, сопровождаемое ростом свободной магнитной энергии. На определенном периоде эволюции активной области при возникновении в магнитной структуре областей диссипации – токовых слоев, в ней развиваются быстротекущие процессы освобождения свободной магнитной энергии – солнечные вспышки и корональные выбросы массы (КВМ). В ходе этих процессов накопленная свободная магнитная энергия преобразуется в энергию нагрева плазмы и ускоренных до высоких энергий частиц, а также в энергию быстрых движений вещества, порождая выбросы плазмы.

Основным механизмом ускорения частиц непосредственно в области вспышек является прямое ускорение электрическим полем при диссипации энергии в токовых слоях активной области в зоне пересоединения магнитных полей с последующим стохастическим ускорением (импульсная составляющая) [1-2]. Кроме того, мощные вспышечные события сопровождаются быстрыми корональными выбросами массы (КВМ) с образованием фронтов ударных волн, которые способны эффективно ускорять частицы до высоких энергий при движении потоков плазмы вблизи Солнца и в межпланетной среде (длительное ускорение). Поэтому в таких сложных событиях (вспышка + КВМ) спектры частиц могут иметь смешанный характер. Вследствие этого, процессы ускорения частиц лежат в основе разделения вспышек и потоков ускоренных частиц на импульсные и длительные события (импульсная плюс продолжительная компонента). Заметим, что в одной вспышечно – активной области может произойти несколько вспышек, связанных с появлением КВМ. По значениям целого ряда параметров можно установить принадлежность вспышек к тому или иному классу [3], хотя в настоящее время считается, что представление о делении вспышек на два класса является несколько упрощенным [4], поскольку в некоторых явлениях разных классов выявляется ряд общих характеристик. На основе сопоставления потоков частиц от импульсных и длительных вспышек Кейн и др. [5] предложили использовать отношение элементов Fe/O в качестве основного показателя для определения двух классов событий. Более того, величина отношения элементов Fe/O в составе вспышечных потоков является мерой проявления FIP-эффекта (First Ionization Potential). Железо относится к элементам с низким первым потенциалом ионизации (FIP < 10 eV), обилия которых в верхней атмосфере Солнца повышены в несколько раз, а содержание кислорода остается близким к фотосферному обилию, поскольку его потенциал ионизации превышает 10 эВ [6-7].

По современным данным величина Fe/O в фотосфере составляет 0.0576, в короне (по спектральным наблюдениям) – 0.187 и в составе вспышечных потоков частиц – 0.131 [8]. Однако, как правило, результаты определений этих отношений относятся лишь к одному или двум энергетическим интервалам, что явно недостаточно для определения зависимости Fe/O от энергии ионов. В связи с этим особенное значение приобретает знание отношения Fe/O в различных

интервалах энергии ионов, которое является индикатором физического состояния среды гелиосферы. Это и будет предметом изучения в настоящей работе.

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 годов. За этот период в течение 669 дней на Солнце вообще отсутствовали активные области. В остальные дни на Солнце существовали лишь пятна и поры с очень небольшими площадями, которые не привели к появлению заметных возмущений в солнечном ветре.

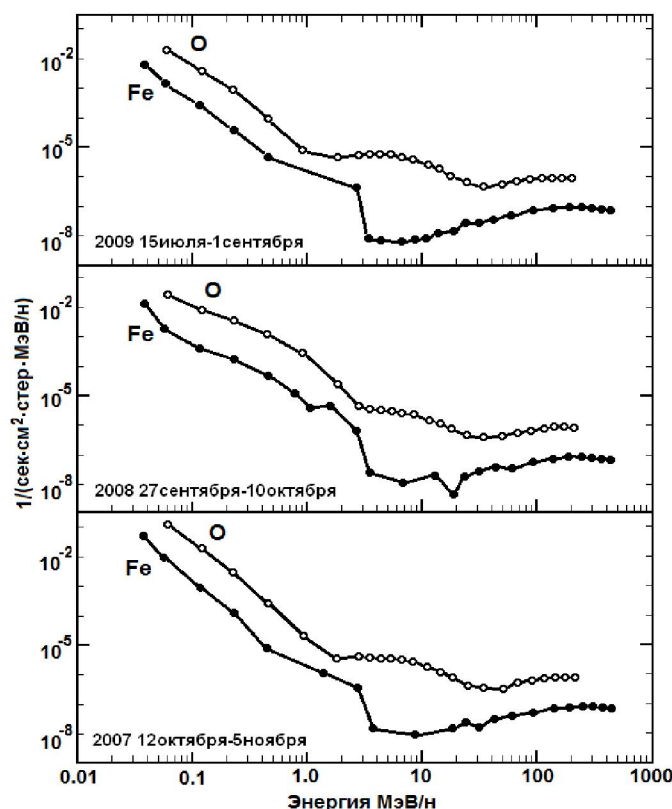


Рисунок 1. - Спектры энергии ионов кислорода и железа в солнечном ветре в интервалы времени с полным отсутствием активных областей на Солнце

Обзор фильтрограмм с космической обсерватории SDO в каналах комплекса AIA 171 Å, 193 Å и 1700 Å в период отсутствия пятен показал, что основными проявлениями активности Солнца являются небольшие участки повышенной яркости в короне в виде отдельных сгустков тонких струй, поднимающихся на небольшую высоту. Они не создают видимых структур в форме замкнутых петель, подобных существующим в активных областях. В фотосфере, в области локализации этих струй, располагаются светлые факельные площадки. Практически по всему диску Солнца наблюдались яркие рентгеновские точки (в том числе и в корональных дырах) - проявления мелкомасштабных активных процессов. В этот же период на Солнце существовали обширные темные корональные дыры (источники быстрого солнечного ветра), причем не только в полярных, но и в экваториальных областях Солнца.

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 полностью 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 значения: 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 частиц/(сек · см² · стер · МэВ/н).

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	Fe/O							
	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±0.0 03	0.150±0. 023	0.004± 0.002	0.010± 0.003	0.053± 0.010	0.089± 0.002	0.101± 0.003

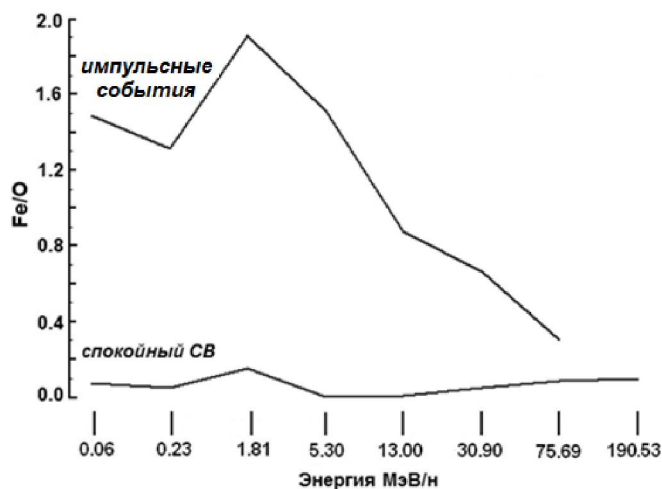


Рисунок 2 – Изменения отношения Fe/O в спокойном солнечном ветре и в потоках частиц при развитии импульсных событий для разных интервалов энергии.

На рисунке 2 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 в разных интервалах энергии ионов. Применение спектров энергии ионов железа и кислорода позволило использовать довольно широкий интервал энергии при расчете их относительного содержания.

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 существенного превышения значений Fe/O во вспышечных энергичных потоках над солнечным ветром в спокойных условиях при $E_k < 30$ МэВ/н, а для более высоких энергий ионов это превышение становится существенно меньшим. Кривые изменения отношения Fe/O для импульсных вспышечных событий и солнечного ветра в условиях минимальной активности показывают подобный ход в интервале малых энергий ионов: 0.06-2.00 МэВ/н. Причем, при энергии $E_k=1.81$ МэВ/н на обеих кривых наблюдаются максимальные

значения Fe/O. Несмотря на разницу в абсолютных значениях Fe/O, в импульсных вспышках во время обычной активности и в спокойных условиях на Солнце происходят процессы, приводящие к относительному усилению в солнечном ветре содержания ионов железа по отношению к ионам кислорода.

Статья выполнена по гранту N 0073-2/ПЦФ-15-МОН

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Алтынцев А.Т., Банин В.Г., Куклин Г.В., Томозов В.М. Солнечные вспышки, М., Наука, 1982. 246 с.
 [2] Прист Э.Р., Форбс Т. Магнитное пересоединение. МГД теория и приложения. М.: Физматлит, 2005. 591с.
 [3] Reames, D. V., Solar energetic particles: A paradigm shift, Rev. Geophys. Suppl., U.S. National Report to IUGG 1991-1994. 1995. P. 585-589.
 [4] Klecker B. Current understanding of SEP acceleration and propagation // 23rd European Cosmic Ray Symp. IOP Publishing. Journal of Physics: Conf. Ser., V. 409. 2013. P. 1-15.
 [5] Cane H.V., Mewaldt R.A., Cohen C. M. S., von Rosenvinge T.T. Role of flares and shocks in determining solar energetic particle abundances // J. Geophys. Res., V.111, 2006. N 6. A06S90.
 [6] Томозов В.М. FIP- эффект как индикатор динамических процессов в солнечной атмосфере и межпланетной среде. Солнечно-земная физика. Вып. 19. 2012. С. 19–35.
 [7] Томозов В.М. О некоторых закономерностях распределения химического состава в атмосферах звезд. Солнечно-земная физика. Вып. 23. 2013. С. 23-32.
 [8] Reames D.V. Element abundances in solar energetic particles and the solar corona. Solar Phys. V. 289. 2014. P. 977-993.

REFERENCES

- [1] Altynceev A.T., Banin V.G., Kuklin G.V., Tomozov V.M. Solnechnye vspyshki, M., Nauka, 1982. 246 s.
 [2] Prist Je.R., Forbs T. Magnitnoe peresoedinenie. MGD teorija i prilozhenija. M.: Fizmatlit, 2005. 591s.
 [3] Reames, D. V., Solar energetic particles: A paradigm shift // Rev. Geophys. Suppl., U.S. National Report to IUGG 1991-1994. 1995. P. 585-589.
 [4] Klecker B. Current understanding of SEP acceleration and propagation // 23rd European Cosmic Ray Symp. IOP Publishing. Journal of Physics: Conf. Ser., V. 409. 2013. P. 1-15.
 [5] Cane H.V., Mewaldt R.A., Cohen C. M. S., von Rosenvinge T.T. Role of flares and shocks in determining solar energetic particle abundances // J. Geophys. Res., V.111, 2006. N 6. A06S90.
 [6] Tomozov V.M. FIP- jeffekt kak indikator dinamicheskikh processov v solnechnoj atmosfere i mezhplanetnoj srede // Solnechno-zemnaja fizika. Vyp. 19. 2012. S. 19–35.
 [7] Tomozov V.M. O nekotoryh zakonomostjakh raspredelenija himicheskogo sostava v atmosferah zvezd // Solnechno-zemnaja fizika. Vyp. 23. 2013. S. 23-32.
 [8] Reames D.V. Element abundances in solar energetic particles and the solar corona // Solar Phys. V. 289. 2014. P. 977-993.

Г.С. Минсянц, Т.М. Минсянц

«В.Г. Фесенков атындағы Астрофизика институты» ЕЖШС, Алматы қ.

В.М. Томозов

Күн-жер физикасының институты, Иркутск, Ресей

КҮННІҢ МИНИМУМ БЕЛСЕНДІ КЕЗІНДЕГІ ИОНДЫҚ ЭНЕРГИЯМЕН Fe/O ҚАТЫНАСЫНЫҢ ӨЗГЕРУІ. I. КҮНДЕ ДАҚТАР ЖОҚ БОЛҒАНДА Fe ЖӘНЕ O ИОНДАРЫНЫҢ ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ СПЕКТРЛЕРІ

Түйін сөздер: күн белсенділігінің минимумы, иондардың энергетикалық спектрлері, Fe/O қатынасы.

Аннотация. Күнде дақтар жоқ болғанда үш созылған аралықтарға 23-ші циклді белсенділік минимумының аралығына темір және оттегі иондарының энергетикалық спектрлері тұрғызылды. ACE, STEREO, WIND ғарыш аппараттарының бақылау мәліметтері қолданылды. Сегіз жеке энергия бөліктеріне 0,006 дан 190,53МэВ/н дейін тыныш күн желіндегі Fe/O қатынасының мәндері есептелген.

Темір және оттегі энергетикалық спектрлер қисығының жүру жолы 2-5 тен 30 МэВ/н дейінгі энергия аралықтарында анағұрлым өзгешелікті көрсетеді – оттегі үшін мәндердің өзгермеуі, темір ионының ағыны айтарлықтай түсуі бақыланады. Бұл энергия аралығында Fe/O =(0,004-0,010) минимальды және абсолютті төменгі мәндерге екеледі.

Минималды белсенділік жағдайында күн желінің және импульсті жарқ ету оқиғалары үшін Fe/O қатынасының мәндерін салыстыру иондардың аз энергия аралығында 0,06-2,00 МэВ/н осыған ұқсас жүру жолдарын көрсетеді. Сонымен бірге, E=1,81МэВ/н энергиясында екі қисықта да, Fe/O максималды мәндері бақыланады. Fe/O абсолютті мәндерінің айырмашылығына қарамастан, минималды белсенділік уақытында күн желінде және импульсті жарқ ету кезінде темір иондарының саны оттегі иондарына қатысты салыстырмалы түрде артатындығын көрсетеді.