

NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES

ISSN 1991-346X

Volume 5, Number 309 (2016), 86 – 90

UDC 523.62

G.S. Minasyants, T.M. Minasyants

Fesenkov 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 IONS' ENERGY
IN THE SOLAR ACTIVITY MINIMUM.
II. ROLE OF ANOMALOUS COMPONENT
OF THE COSMIC RAYS IN A CYCLE MINIMUM**

Abstract. The energetic particle sources of a different origin which determine physical conditions in a solar wind in period of activity minimum are described. Minimal values of Fe/O ratio in a low energy region ~2-30 MeV/n are quite well explained by anomalous component cosmic rays (CR) influence. The anomalous CR component effect leads to increased flux intensity of ions with a high first ionization potential (FIP) (H, He, N and O) while elements with a low FIP (C, Mg, Si and Fe) show a flux weakening. As for ions of higher energy ($E_k > 30$ MeV/n), the increase of the Fe/O ratio is connected to major influence of galactic cosmic rays on solar wind characteristics in minimum activity conditions.

Keywords: solar activity minimum, galactic cosmic rays, anomalous component, 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

**ИЗМЕНЕНИЯ ЗНАЧЕНИЙ Fe/O С ЭНЕРГИЕЙ ИОНОВ
В МИНИМУМЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ II.
РОЛЬ АНОМАЛЬНОЙ КОМПОНЕНТЫ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ
В МИНИМУМЕ ЦИКЛА**

Аннотация. Описаны источники энергичных частиц различной природы, определяющие физические условия в солнечном ветре в период минимума активности. Минимальные значения Fe/O в диапазоне низких энергий ~ 2-30 МэВ/н хорошо объясняются влиянием аномальной компоненты космических лучей. Действие этой компоненты приводит к усилению интенсивности потоков ионов с высоким первым потенциалом ионизации - FIP (H,He,N,O), а элементы с низким FIP (C,Mg,Si,Fe), показывают ослабление потоков. Что касается ионов более высоких энергий ($E_k > 30$ МэВ/н), то рост значений Fe/O связан с определяющим влиянием галактических космических лучей на свойства солнечного ветра в условиях минимума активности.

Ключевые слова: минимум солнечной активности, галактические космические лучи, аномальная компонента, отношение Fe/O.

В относительном содержании примесных химических элементов в солнечном ветре 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 и 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 [1]. По мере роста энергии ионов, значения Fe/O могут последовательно характеризовать основные свойства солнечного ветра: а) при преобладающем влиянии Солнца, б) при совместном воздействии Солнца и ГКЛ и, наконец, в) при влиянии самих ГКЛ.

Поэтому основной задачей данного исследования является выяснение характера влияния на физические условия в солнечном ветре таких дополнительных источников, как ГКЛ и их аномальная компонента (АКЛ).

Рассчитанные и представленные на рисунке 1 в I-ой части нашей статьи [2], спектры энергии ионов Fe и O для солнечного ветра при полном отсутствии пятен обладают некоторыми особенностями. Обычно гладкие профили спектров Fe, в наших случаях, имеют довольно существенный провал значений в диапазоне энергии $\sim 2-30$ МэВ/н. Профили же спектров ионов O, напротив, не показывают спада или даже демонстрируют слабое усиление. Для сопоставления характеристик частиц и ионов различных элементов были построены их спектры энергии для общего периода минимума цикла активности (рис. 1).

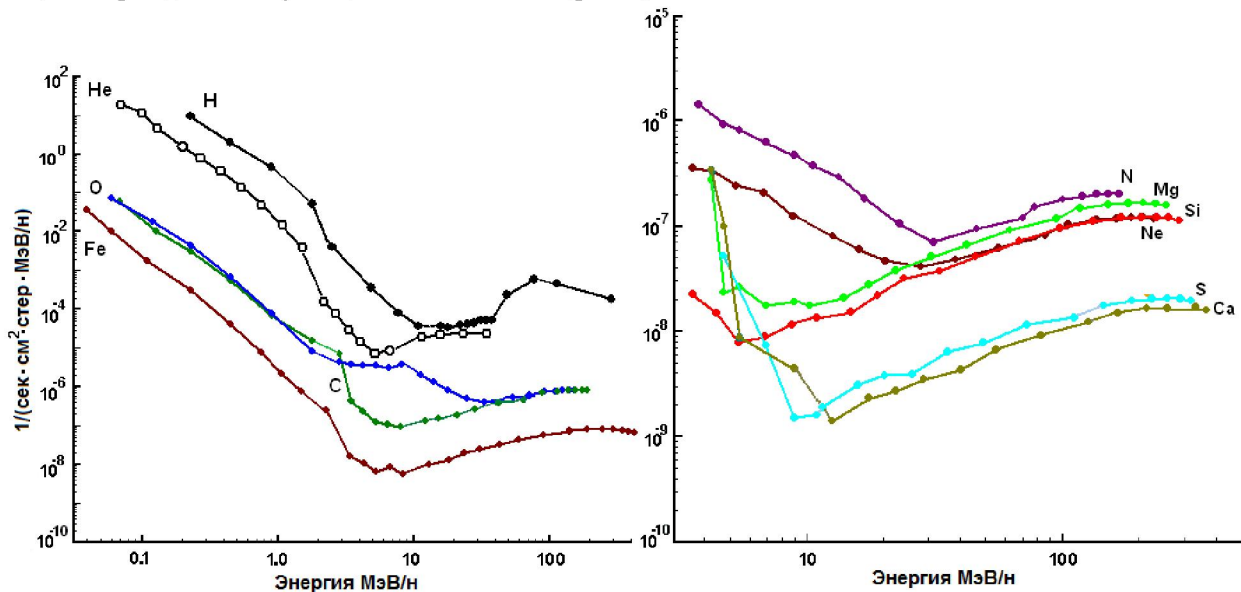


Рисунок 1. - Спектры энергии частиц и ионов солнечного ветра, в период минимума 23-го цикла активности (1 апреля 2007 г. - 31 декабря 2009 г.).

На рисунке 1 для эпохи минимума солнечной активности хорошо просматривается тенденция, когда вместо спада потока частиц при $E_k > 30$ МэВ/н наблюдается его возрастание благодаря влиянию галактических космических лучей [1]. Спектры энергий для всех элементов характеризуются ростом значений с максимумами при $E_k \sim 100-300$ МэВ/н. Отмечена такая закономерность: чем выше заряд элемента, тем более высокой энергии достигает максимум значения потока ГКЛ. Для рассмотренных элементов наблюдается усиление потоков частиц в области энергии ГКЛ примерно на порядок.

В 1973 г. был открыт новый вид космических лучей – аномальная компонента космических лучей (АКЛ) [3]. В отличие от ГКЛ, представляющих ядра различных элементов, АКЛ состоят из

частично ионизованных атомов с высоким первым потенциалом ионизации (He, N, O, Ne, Ar) [4]. На рисунке 2 приведены спектры энергии кислорода и углерода по наблюдениям с КА Pioneer 11 для периода минимума 20-го цикла активности. Наблюдается отчетливый максимум энергетического спектра для кислорода при энергиях $\sim 2 - 20$ МэВ/н.

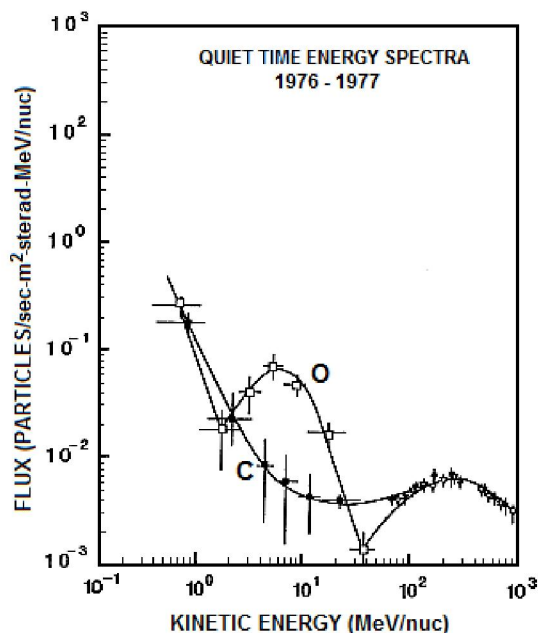


Рисунок 2 - Энергетические спектры кислорода и углерода, по экспериментальным данным КА Pioneer 11 [5]

Подобные наблюдения показывают “аномальное” поведение, как энергетических спектров, так и состава космических лучей в интервале энергий $\sim 2 - 20$ МэВ/н для элементов He, N, O, Ne. Явный избыток при $E_k \sim 10$ МэВ/н этой группы элементов и недостаток C, Mg, Si и Fe по сравнению с ГКЛ (при $E_k > 30$ МэВ/н) хорошо заметны на энергетических спектрах и в период минимума 23-го цикла (рис.1). Аномальные космические лучи, в отличие от СКЛ и ГКЛ, характеризуются относительным преобладанием в своем составе таких элементов, как He, O, Ne и Ar.

После экспериментального подтверждения существования аномальной популяции космических лучей [6-7], происхождение которой отличается как от солнечного, так и от галактического, возник вопрос о физической природе АКЛ.

Наиболее обоснованная теория происхождения АКЛ была предложена в 1974 г. в работе Fisk et al. [8]. Частицы АКЛ образуются при проникновении в гелиосферу нейтральных атомов из межзвездной среды с высоким потенциалом 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 [9]. 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 (механизмом Ферми) до энергий ~ 10 МэВ/нуклон. Затем они могут вновь вернуться к Солнцу. Доказано, что этот процесс может повторяться неоднократно. Отметим, что ионы элементов с низким потенциалом FIP ионизируются уже в локальной межзвездной среде и не способны проникнуть внутрь гелиосферы [9].

В результате действия предложенного механизма ускорения частиц АКЛ предполагается увеличение интенсивности потока элементов с высоким первым потенциалом ионизации, в том числе и кислорода. В то же время элементы с низким ионизационным потенциалом не должны показывать такого увеличения, это относится к ионам C, Mg, Si, Fe.

Необходимо подчеркнуть, что основные положения предложенной теории происхождения АКЛ [8] были в дальнейшем подтверждены наблюдениями и получили развитие и детальное

обоснование. Это касается и величин зарядовых состояний ионов АКЛ и моделей их распространения и ускорения в области гелиосферы [10-13].

Таким образом, физические условия в солнечном ветре в эпоху минимума цикла солнечной активности можно описать тремя характерными состояниями, связанными с энергиями частиц, условные границы раздела которых по энергиям составляют 2-5 МэВ/н и 20-30 МэВ/н. При энергиях ионов $E_k \leq 2$ МэВ/н – условия в солнечном ветре определяются, в основном, влиянием Солнца, а в интервале энергий (2-30) МэВ/н должен сказываться вклад аномальной компоненты космических лучей. При этом в плазме солнечного ветра при рассматриваемых спокойных условиях характерно проявление интересного эффекта: содержание ионов элементов с более высоким первым потенциалом ионизации превышает содержание ионов с более низким потенциалом ионизации. Протоны и ионы с энергиями > 30 МэВ/н имеют, в основном, галактическое происхождение [1,4]. Разница значений Fe/O в энергичных вспышечных потоках и соответствующих им Fe/O в солнечном ветре в спокойных условиях при $E_k < 30$ МэВ/н, достигает величины ~ 1.5 . Для ионов с более высокими энергиями при преобладающем влиянии потоков частиц ГКЛ эта разница значительно меньше.

Таким образом, становится понятной причина существования низких, минимальных величин Fe/O = 0.004 и 0.010 при значениях энергии $E_k = 5.3$ и 13.0 МэВ/н, соответственно. Подчеркнем, что при появлении активных областей на Солнце ход спектров энергии для всех элементов становится подобным и показывает быстрый непрерывный спад потоков ионов, особенно при энергиях в сотни МэВ/н.

Работа выполнена по проекту N 0073-2/ПЦФ-15-МОН

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Garrard T. L. et al. The Advanced Composition Explorer Mission // Proc. 25th ICRC. 1997. Vol. 1, P.105-108.
- [2] Минасянц Г.С., Минасянц Т.М., Томозов В.М. Изменение значений Fe/O с энергией ионов в минимуме солнечной активности I. Энергетические спектры ионов Fe и O в отсутствие пятен на Солнце // Известия НАН РК-2016-№4-С.
- [3] Garcia-Munoz M., Mason G.M., Simpson J.A. The anomalous 1972 low energy galactic cosmic ray proton and helium spectra // Proc. 13th ICRC. 1973. V. 2. P. 1304–1307.
- [4] Базилевская Г.А., Стожков Ю.И. Энергичные частицы и космические лучи: галактические, гелиосферные и солнечные космические лучи // Плазменная гелиогеофизика. Под ред. Л. М. Зеленого и И. С. Веселовского. Сборник в 2-х томах. Том 1. М. 2008. С.345-357.
- [5] Panasyuk M.I. The trapped anomalous component of the cosmic rays: the short overview of experiments // Proc. of the 23 Int. Cosmic Ray Conference. 1993. P.455-463.
- [6] Hovestadt D.O., Valmer, O., Gloeckler, G., Fan, C. Differential energy spectra of low-energy (< 8.5 MeV per nucleon) heavy cosmic ray during solar quiet time // Phys. Rev. Lett. 31. 1973. P. 650-667.
- [7] McDonald F.B., Teegarden B.J., Trainor J.H. and Webber W.R. The anomalous abundance of cosmic ray nitrogen and oxygen at low energies // Astrophys. J. V.187. 1973. P.105-108.
- [8] Fisk L.A., Kozlovsky B., Ramaty R. An interpretation of the observed oxygen and nitrogen enhancement in low energy cosmic rays // Astrophys. J. (Lett.) V. 190, 1974. P. 35-38.
- [9] Reames D.E. Energetic particle composition // Solar and galactic composition: A Joint SOHO/ACE Workshop. AIP Conf. Proc., V. 598, 2001. P. 153-164.
- [10] Möbius E., Hovestadt D., Klecker B., Scholer M., Gloeckler G. and Ipavich F.M. Direct observations of He⁺ pick-up ions of interstellar origin in the solar wind // Nature 318. 1985. P. 426-429.
- [11] Jokipii, J.R., Particle acceleration at a termination shock. // J. Geophys. Res. V. 91. 1986. P.2929 – 2932.
- [12] Adams J., Leising L. Maximum distance to the acceleration site of the anomalous component of cosmic rays // Proc. 22nd Intern. Cosmic Ray Conf. (Dublin). V. 3. 1996. P.304.
- [13] Ness N., Burlaga L.F., Acuna M.H., Lepping R.P., Connerney J.E.P. Termination shock and heliosheath studies at >92 AE: Voyager 1 magnetic field measurements // Nature V. 430. 2005. P.48-56.

REFERENCES

- [1] Garrard T. L. et al. The Advanced Composition Explorer Mission // Proc. 25th ICRC. 1997. Vol. 1, P.105-108.
- [2] Minasyants G.S., Minasyants T.M., Tomozov V.M. Izmenenie znachenij Fe/O s jenergiej ionov v minimume solnechnoj aktivnosti I. Jenergeticheskie spektry ionov Fe i O v otsutstvii pjaten na Solnce // Izvestija NAN RK-2016-№4-S.
- [3] Garcia-Munoz M., Mason G.M., Simpson J.A. The anomalous 1972 low energy galactic cosmic ray proton and helium spectra // Proc. 13th ICRC. 1973. V. 2. P. 1304–1307.

[4] Bazilevskaja G.A., Stozhkov Ju.I. Jenergichnye chasticy i kosmicheskie luchy: galakticheskie, geliosfernye i solnechnye kosmicheskie luchy //Plazmennaja geliogeofizika. Pod red. L. M. Zelenogo i I. S. Veselovskogo. Sbornik v 2-h tomah. Tom 1. M. 2008. S.345-357.

[5] Panasyuk M.I. The trapped anomalous component of the cosmic rays: the short overview of experiments // Proc. of the 23 Int. Cosmic Ray Conference. 1993. P.455-463.

[6] Hovestadt D.O., Valmer, O., Gloeckler, G., Fan, C. Differential energy spectra of low-energy (< 8.5 MeV per nucleon) heavy cosmic ray during solar quiet time // Phys. Rev. Lett. 31. 1973. P. 650-667.

[7] McDonald F.B., Teegarden B.J., Trainor J.H. and Webber W.R. The anomalous abundance of cosmic ray nitrogen and oxygen at low energies // Astrophys. J. V.187. 1973. P.105-108.

[8] Fisk L.A., Kozlovsky B., Ramaty R. An interpretation of the observed oxygen and nitrogen enhancement in low energy cosmic rays // Astrophys. J. (Lett.) V. 190, 1974. P. 35-38.

[9] Reames D.E. Energetic particle composition // Solar and galactic composition: A Joint SOHO/ACE Workshop. AIP Conf. Proc., V. 598, 2001. P. 153-164.

[10] Möbius E., Hovestadt D., Klecker B., Scholer M., Gloeckler G. and Ipavich F.M. Direct observations of He⁺ pick-up ions of interstellar origin in the solar wind // Nature 318. 1985. P. 426-429.

[11] Jokipii, J.R., Particle acceleration at a termination shock. // J. Geophys. Res. V. 91. 1986. P.2929 – 2932.

[12] Adams J., Leising L. Maximum distance to the acceleration site of the anomalous component of cosmic rays // Proc. 22nd Intern. Cosmic Ray Conf. (Dublin). V. 3. 1996. P.304.

[13] Ness N., Burlaga L.F., Acuna M.H., Lepping R.P., Connerney J.E.P. Termination shock and heliosheath studies at >92 AE: Voyager 1 magnetic field measurements // Nature V. 430. 2005. P.48-56.

Г.С. Минасянц, Т.М. Минасянц

«В.Г. Фесенков атындағы Астрофизика институты» ЕШЖС, Алматы, Қазақстан

В.М. Томозов

Күн-жер физикасы институты, Иркутск, Ресей

**КҮН БЕЛСЕНДІЛІГІ МИНИМУМЫНДА ИОНДАР ҚУАТЫМЕН Fe/O МӘНІНІҢ ӨЗГЕРУІ. II.
ЦИКЛДІҢ МИНИМУМЫНДА ҒАРЫШ СӘУЛЕЛЕРІНІҢ
АНОМАЛДЫ КОМПОНЕНТТЕРІНІҢ РОЛІ**

Аннотация. Белсенділіктің минимум кезеңінде күн желінде физикалық жағдайды анықтайтын әртүрлі табиғаттардың қуатты бөлшектерінің көздері сипатталды. ~ 2-30 МэВ/н төмен қуаттың диапазонында Fe/O минималды мәні ғарыш сәулелерінің аномалды компоненттерінің әсерімен жақсы түсіндіріледі. Бұл компоненттердің қозғалысы FIP (H,He,N,O) иондалудың жоғары алғашқы потенциалымен иондар ағымдардың қарқындылығының артуына алып келеді, ал, төмен FIP (C,Mg,Si,Fe) элементтер ағымдардың әлсізденуін көрсетеді. Аса жоғары қуаттағы иондарға келетін болсақ ($E_k > 30$ МэВ/н), онда өсу мәні Fe/O минималды белсенділік жағдайында күн желі қасиетіне галактикалық ғарыш сәулелерінің анықталған әсерімен байланысты.

Түйін сөздер: минимум күн белсенділігі, галактикалық ғарыш сәулесі, аномалды компонент, Fe/O қатынас.