

Г. С. МИНАСЯНЦ¹, Т. М. МИНАСЯНЦ²

(ДТОО «Астрофизический институт им. В.Г. Фесенкова», г. Алматы)

СВОЙСТВА ПОТОКОВ ЧАСТИЦ РАЗЛИЧНЫХ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В СПОКОЙНОМ СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ

С целью изучения изменений потоков частиц в спокойном солнечном ветре было исследовано поведение 15 различных химических элементов с зарядовым числом $1 \leq Z \leq 28$: *H, He, C, N, O, Ne, Na, Mg, Al, Si, S, Ar, Ca, Fe, Ni*. Использовались космические наблюдения Солнца на спутниках ACE (приборы ULEIS, EPAM, SIS, CRIS), WIND (EPACT/LEMT), STEREO (LET, HET), GOES. Общий интервал энергии для частиц и ионов составлял (0.06-500) МэВ/нуклон.

Для стадии спокойного солнечного ветра в минимуме 23-го цикла активности (1 апреля 2007 г. – 31 декабря 2009 г.) были построены энергетические спектры частиц и ионов различных химических элементов. Это позволило рассчитать относительное содержание этих элементов в спокойном солнечном ветре и сравнить его со стандартным обилием в короне.

Полученные значения относительного содержания элементов в спокойном солнечном ветре показывают пониженные значения по сравнению с корональными, особенно для тяжелых элементов: *Ne*,

Si, Fe. При совместном влиянии излучения Солнца и галактических космических лучей в солнечном ветре четко проявляется, так называемый, аномальный компонент галактических лучей, при этом наблюдается избыточное количество ядер – *N, O, Ne, Ar, Ca*. В галактических космических лучах для всех элементов, за исключением *He*, наблюдается повышенное их содержание.

Для спектра энергии элементов солнечного ветра в период минимума цикла в области ~ 5 МэВ/нуклон наблюдается излом кривой и в дальнейшем ее ход определяется излучением галактических космических лучей. В эпоху минимума солнечного цикла интенсивность галактического фона в несколько раз выше, чем в максимуме.

Ход годовых значений потоков ионов Fe галактических космических лучей и чисел Вольфа позволяет предположить высокую солнечную активность в текущем 2014 году.

Ключевые слова: солнечный ветер, энергетические спектры, химический состав.

Тірек сөздер: күн желі, энергетикалық спектрлер, химиялық құрам.

Key words: solar wind, spectra energy, chemical composition.

Исследование химического состава солнечного ветра является важной задачей, позволяющей получить научную информацию о физических условиях в источниках его формирования. Относительное содержание химических элементов в солнечном ветре имеет отличия от химического состава в атмосфере Солнца, что также требует четкого объяснения. В обилии элементов наблюдаются изменения, которые связаны с фазой солнечного цикла и вспышечной активностью Солнца.

Вариация потоков солнечного ветра определяется двумя основными факторами: генерацией энергичных частиц на Солнце и условиями распространения галактических космических лучей (ГКЛ) в межпланетной среде. Основной причиной, влияющей на изменение условий распространения малоэнергичной части ГКЛ, 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 их максимальному проявлению, начиная с энергии $E_k > (5-20)$ МэВ/нуклон [1]. Таким образом, физические условия в спокойном солнечном ветре в эпоху минимума цикла можно условно разделить по энергиям частиц на два характерных состояния, с границей раздела около 5 МэВ/нуклон. Причем в интервале энергий (5-20) МэВ/нуклон наблюдается совместное влияние Солнца и ГКЛ. Протоны и ядра с энергиями $> (20-30)$ МэВ/нуклон имеют галактическое происхождение.

Продолжительный минимум 23-го цикла активности предоставил возможность на длительном интервале времени проследить за вариациями потоков различных химических элементов в спокойном солнечном ветре. За всю историю регулярных наблюдений Солнца с 1700 года лишь 2 цикла активности в стадии минимума имели более низкие значения чисел Вольфа. Декабрь 2008 года был определен как минимум предыдущего цикла активности. Поэтому нами для исследования спокойного солнечного ветра выбран промежуток с 1 апреля 2007 по 31 декабря 2009 годов. За этот период в течение 669 дней вообще отсутствовали активные области на Солнце. В остальные дни на Солнце присутствовали лишь поры и пятна очень маленькой площади, которые не создали заметных возмущений в солнечном ветре.

Для выбранного временного интервала были построены спектры энергии 15 различных химических элементов с $1 \leq Z \leq 28$: H, He, C, N, O, Ne, Na, Mg, Al, Si, S, Ar, Ca, Fe, Ni. Использовались космические наблюдения Солнца на спутниках ACE (приборы ULEIS, EPAM, SIS, CRIS), WIND (EPACT/LEMT), STEREO (LET, HET), GOES. Общий интервал энергии для частиц и ионов составлял (0.06-500) МэВ/нуклон.

На рисунке 2.1 показаны рассчитанные спектры энергии для всех рассмотренных элементов в период минимума 23-го цикла активности. Обычный довольно гладкий ход профилей спектра в нашем случае имеет излом в диапазоне энергий $\sim 5-20$ МэВ/нуклон, что связано с присутствием

частиц галактических космических лучей. Вклад их усиливается с ростом энергии и достигает максимума для разных элементов в интервале от 23 до 297 МэВ/нуклон.

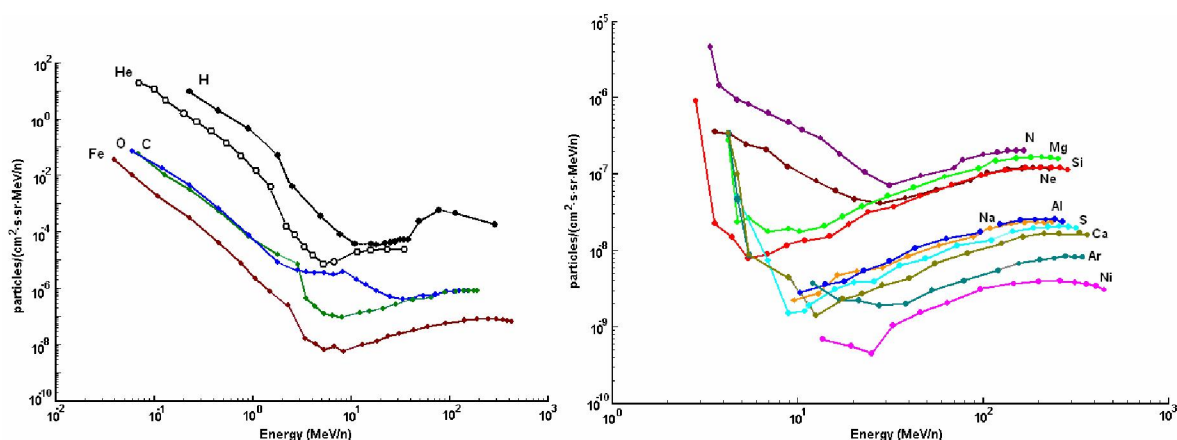


Рисунок 2.1 – Спектры энергии частиц и ионов легких и тяжелых элементов спокойного солнечного ветра, включая вклад галактических космических лучей в период минимума цикла активности (1 апреля 2007 г. - 31 декабря 2009 г.)

Усиление потоков частиц в области энергий ГКЛ, примерно на порядок, наблюдается для всех рассмотренных элементов. Заметна тенденция: чем выше заряд ядра элемента, тем на более высокую энергию приходится максимум значения потока ГКЛ.

Таблица 2.1 – Значения обилия 15-ти химических элементов ($1 \leq Z \leq 28$) в короне Солнца и рассчитанных относительных содержаний этих элементов в спокойном солнечном ветре

Атомн номер	Эл-нт	Обилие элементов в короне	Содерж. элем. в СВ при $E_k=1$ МэВ/н	Содерж. элем. в СВ при $E_k=10$ МэВ/н	Содержание элементов в ГКЛ
1	H	1.00	1.00	1.00	1.00
2	He	$6.08 \cdot 10^{-2}$	$2.70 \cdot 10^{-2}$	$3.73 \cdot 10^{-2}$	$4.18 \cdot 10^{-2}$
6	C	$2.26 \cdot 10^{-4}$	$9.25 \cdot 10^{-5}$	$2.26 \cdot 10^{-4}$	$1.41 \cdot 10^{-3}$
7	N	$5.17 \cdot 10^{-5}$	-	$7.90 \cdot 10^{-4}$	$3.41 \cdot 10^{-4}$
8	O	$4.11 \cdot 10^{-4}$	$1.22 \cdot 10^{-4}$	$5.45 \cdot 10^{-3}$	$1.40 \cdot 10^{-3}$
10	Ne	$8.01 \cdot 10^{-5}$	$1.20 \cdot 10^{-5}$	$2.12 \cdot 10^{-4}$	$2.06 \cdot 10^{-4}$
11	Na	$4.17 \cdot 10^{-6}$	-	$4.52 \cdot 10^{-6}$	$3.97 \cdot 10^{-5}$
12	Mg	$7.41 \cdot 10^{-5}$	-	$3.38 \cdot 10^{-5}$	$2.79 \cdot 10^{-4}$
13	Al	$6.16 \cdot 10^{-6}$	-	$6.20 \cdot 10^{-6}$	$4.31 \cdot 10^{-5}$
14	Si	$7.24 \cdot 10^{-5}$	$7.83 \cdot 10^{-6}$	$2.87 \cdot 10^{-5}$	$2.03 \cdot 10^{-4}$
16	S	$1.69 \cdot 10^{-5}$	-	$3.54 \cdot 10^{-6}$	$3.47 \cdot 10^{-5}$
18	Ar	$2.26 \cdot 10^{-6}$	-	$9.43 \cdot 10^{-6}$	$1.43 \cdot 10^{-5}$
20	Ca	$4.36 \cdot 10^{-6}$	-	$7.86 \cdot 10^{-6}$	$2.89 \cdot 10^{-5}$
26	Fe	$7.08 \cdot 10^{-5}$	$3.67 \cdot 10^{-6}$	$1.41 \cdot 10^{-5}$	$1.40 \cdot 10^{-4}$
28	Ni	$3.55 \cdot 10^{-6}$	-	$1.47 \cdot 10^{-6}$	$6.68 \cdot 10^{-6}$

Для более подробного исследования мы весь энергетический диапазон солнечного ветра (СВ) разбили на три интервала с характерными значениями энергии: $E_k = 1$ МэВ/нуклон – условия определяются излучением Солнца; $E_k = 10$ МэВ/нуклон – излучение Солнца + галактические космические лучи; третий интервал при $E_k > 20$ МэВ/нуклон - ГКЛ.

Используя значения потоков излучения разных элементов, было рассчитано их относительное содержание в солнечном ветре для указанных характерных энергий (таблица 2.1). Из-за отсутствия данных для некоторых элементов в интервале энергии $E_k = 1$ МэВ/нуклон имеются пробелы в столбце их относительного содержания.

На рисунке 2.2 наглядно представлено сопоставление обилия химических элементов в короне Солнца [2] и рассчитанных значений их относительных содержаний для характерных энергий частиц и ионов в спокойном солнечном ветре в течение стадии минимума активности цикла.

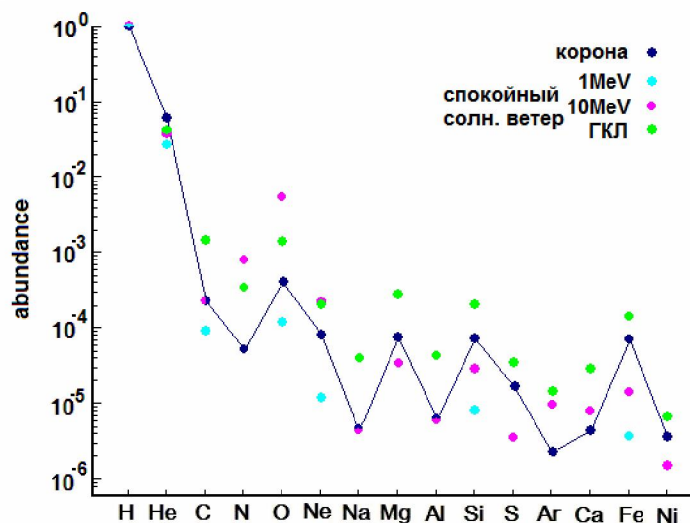


Рисунок 2.2 – Сопоставление обилия элементов в солнечной короне и их относительного содержания в спокойном солнечном ветре при энергиях 1 МэВ/нуклон, 10 МэВ/нуклон и (23-297) МэВ/нуклон для галактических космических лучей

Относительное содержание, оцененное для отдельных химических элементов солнечного ветра, обусловленного только излучением Солнца (при 1 МэВ/нуклон), показывает пониженные значения по сравнению с корональными. Наиболее заметно это для тяжелых элементов: Ne, Si, Fe. При совместном влиянии излучения Солнца и ГКЛ (10 МэВ/нуклон) четко проявляется, так называемый, аномальный компонент галактических лучей, благодаря которому появляется избыток некоторых ядер (N, O, Ne, Ar, Ca). Наблюдается повышенное содержание всех элементов с энергией ГКЛ (>20 МэВ/нуклон), за исключением He.

На примере энергетических дифференциальных спектров потоков Fe (рисунок 2.3) можно проследить, как меняются интенсивности потоков солнечного ветра при различных уровнях активности Солнца для разных интервалов энергии.

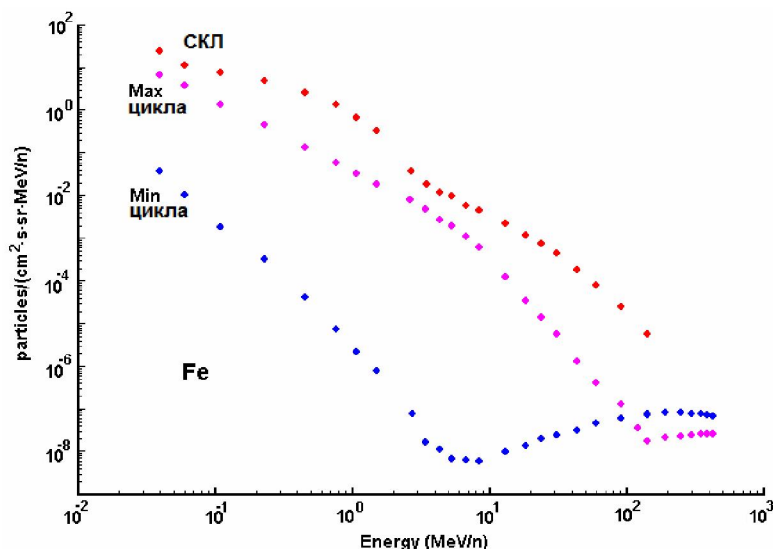


Рисунок 2.3 – Спектры энергии ионов Fe: СКЛ – вспышка солнечных космических лучей 13 декабря 2006 г.; Max цикла – 2001 год; Min цикла – период (1 апреля 2007 г. – 31 декабря 2009 г.)

Для спектра энергии минимума цикла в области ~ 5 МэВ/нуклон наблюдается излом кривой и в дальнейшем ее ход определяется излучением ГКЛ. Интенсивность галактического фона в эпоху минимума цикла в несколько раз превышает её для максимума цикла. Наибольшее усиление интенсивности потока во вспышке СКЛ наблюдается для энергии > 10 МэВ/нуклон, при этом существенно превышающие значения потоков ГКЛ.

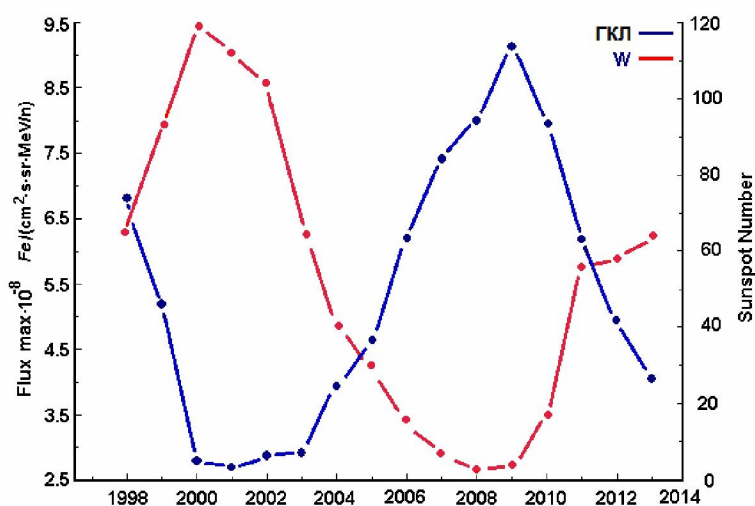


Рисунок 2.4 – Сопоставление максимальных значений потока ионов Fe галактических космических лучей (ГКЛ) и чисел Вольфа (W) в период 1998 г. – 2013 г.

Для периода 1998 г. – 2013 г. были определены ежегодные максимальные значения потоков интенсивности ионов Fe галактических космических лучей. Интервал энергий для максимальных значений потоков составлял (190.53–387.66) МэВ/нуклон. Сопоставление максимумов потоков Fe для ГКЛ и чисел Вольфа (рисунок 2.4) показывает классическую картину антикорреляции между этими величинами. Сравнение значений ГКЛ и W за 2013 год позволяет сделать предположение о возможной высокой активности Солнца в 2014 году.

Результаты и выводы:

Для стадии спокойного солнечного ветра в течение минимума 23-го цикла активности (1 апреля 2007 г. – 31 декабря 2009 г.) были построены энергетические спектры частиц и ионов 15-ти различных химических элементов для стадии спокойного солнечного ветра в течение минимума 23-го цикла активности (1 апреля 2007 г. – 31 декабря 2009 г.). Это позволило рассчитать относительное содержание этих элементов в спокойном солнечном ветре и сравнить его со стандартным обилием в короне.

В результате работы, с помощью энергетических спектров частиц и ионов 15-ти различных химических элементов для стадии спокойного солнечного ветра, было рассчитано их относительное содержание и проведено сравнение со стандартным обилием в короне. Установлено, что относительное содержание, элементов в спокойном солнечном ветре показывает пониженные значения по сравнению с корональными, особенно для тяжелых элементов: Ne, Si, Fe. Четко проявляется, так называемый аномальный компонент галактических лучей, под совместным влиянием излучения Солнца и галактических космических лучей в солнечном ветре. В это же время, наблюдается избыточное количество ядер – N, O, Ne, Ar, Ca. В солнечном ветре, при наличии галактических космических лучей, наблюдается повышенное содержание всех элементов, за исключением He.

Для спектра энергии элементов солнечного ветра в период минимума цикла в области ~ 5 МэВ/нуклон наблюдается излом кривой и в дальнейшем ее ход определяется излучением ГКЛ. Интенсивность галактического фона в эпоху минимума цикла в несколько раз превышает её для максимума цикла.

Ход годовых значений потоков ионов Fe галактических космических лучей и чисел Вольфа позволяет предположить высокую солнечную активность в текущем 2014 году.

Работа выполнена по программе «Изучение физических свойств избранных объектов солнечной системы».

ЛИТЕРАТУРА

- 1 *Свертилов С.И.* Вариации и история космических лучей. //Солнечно - земная Физика. Сервер «СиЗиФ». – 2002. <http://www.kosmofizika.ru>
- 2 *Schmelz J.T. et al.* Composition of the Solar Corona, Solar Wind, and Solar Energetic Particles // Ap.J. 2012 . – 755:33.

REFERENCES

- 1 *Svertilov S.I.* Solnechno – zemnaja Fizika. Server «SiZiF». – 2002. <http://www.kosmofizika.ru>
- 2 *Schmelz J.T. et al.* Ap.J. 2012 . – 755:33.

Резюме

Г. С. Минасянц, Т. М. Минасянц

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

ТЫНЫШ КҮН ЖЕЛІНДЕГІ ӨРТҮРЛІ ХИМИЯЛЫҚ ЭЛЕМЕНТТЕРДЕГІ БӨЛШЕКТЕР АҒЫНЫНЫҢ ҚАСИЕТТЕРІ

Тыныш Күн желіндегі бөлшектер ағынының өзгерісін зерттеу мақсатымен зарядтық сандары $1 \leq Z \leq 28$ болатын өртүрлі 15 химиялық элементтерге зерттеу жүргізілді: *H, He, C, N, O, Ne, Na, Mg, Al, Si, S, Ar, Ca, Fe, Ni*. Күнді ғарыштан бақылаған жасанды жер серіктерінің ACE (құралдар ULEIS, EPAM, SIS, CRIS), WIND (EPACT/LEMT), STEREO (LET, HET), GOES мәліметтері қолданылды. Бөлшектер және иондар үшін энергияның жалпы интервалы (0.06-500) МэВ/нуклонды құрайды.

Тыныш Күн желінің 23-ші циклдегі минимумының белсенділік сатысына (2007 ж. 1 сәуірінен – 2009 ж. 31 желтоқсанға дейінгі) өртүрлі химиялық элементтер үшін бөлшектер мен иондардың энергетикалық спектрлері құрылды. Бұл элементтердің салыстырмалы түрде тыныш Күн желіндегі құрамын есептеуге және Күн тәжіндегі артық стандарттармен салыстыруға мүмкіндік берді.

Тыныш Күн желіндегі элементтер құрамына қатысты алынған мәндер Күн тәжімен салыстырғанда аз мәндерді көрсетеді, әсіресе ауыр элементтер үшін: *Ne, Si, Fe*. Күннің сәулеленуі және ғаламның ғарыштық сәулелерінің біріккен Күн желіне әсер етуі кезінде, ауытқушы компонент деп аталатын ғаламдық сәулеленуі, сонымен бірге ядролар санының артықтығы байқалады – *N, O, Ne, Ar*. Ғаламдақ ғарыштық сәулеленуде барлық элементтердің, тек қана *He* басқаларының, көптігі байқалады.

Күн желінде элементтердің энергиялық спектрлері үшін минимум цикл аралығындағы ~5 МэВ/нуклон аймағында қисықтың сынуы байқалады және оның болашақтағы жолы ғаламдық ғарыштық сәулеленумен анықталады. Күннің минимум цикліндегі ғаламдық аяның қарқындылығы максимумға карағанда бірнеше рет жоғары.

Ғаламдық ғарыштық сәулелердің *Fe* иондар ағынының жылдық мәндерінен және Вольф сандарынан ағымдағы 2014 жылда жоғары Күн белсенділігін болжауға мүмкіндік береді.

Тірек сөздер: күн желі, энергетикалық спектрлер, химиялық құрам.

Summary

G. S. Minasyants and T. M. Minasyants

(Fesenkov Astrophysics Institute, Almaty)

PROPERTIES OF FLUXES OF THE PARTICLES OF DIFFERENT CHEMICAL ELEMENTS IN QUIET SOLAR WIND

In order to study variations of the particles fluxes in quiet solar wind, the behavior of 15 different chemical elements with nuclear charge $1 \leq Z \leq 28$: *H, He, C, N, O, Ne, Na, Mg, Al, Si, S, Ar, Ca, Fe, Ni* were investigated. Observations of the Sun on the following spacecrafts: ACE (devices ULEIS, EPAM, SIS, CRIS), WIND (EPACT/LEMT), STEREO (LET, HET), GOES were used. The general interval of energy for the particles and ions was equaled to (0.06-500) MeV/nucleon.

For a stage of quiet solar wind in the minimum of 23-rd cycle of activity (April, 1, 2007 – December, 31, 2009) the energy spectra of particles and ions of various chemical elements have been constructed. It has allowed

to calculate abundances of these elements in quiet solar wind and to compare them with standard abundance in corona.

The obtained values of the element abundances in quiet solar wind show the lower values in comparison with coronal, especially for the heavy elements: Ne, Si, Fe. The so-called, abnormal component of galactic rays is precisely found out under the joint influence of the solar and galactic cosmic rays radiation on the chemical composition of solar wind, and excess of the nucleus quantity of N, O, Ne, Ar, Ca is observed. Increased abundances of all elements, except He, are observed in the galactic cosmic rays.

For the energy spectrum of elements of solar wind during a minimum of a cycle the break of a curve is observed in the range of ~ 5 MeV/nucleon and its further behavior is determined by radiation of the galactic cosmic rays. During an epoch of a minimum of a solar cycle the intensity of galactic background is some times higher, than in a maximum.

Variations of the annual values of the fluxes of the Fe ions of galactic cosmic rays and changes of the Wolf numbers allow to predict the high solar activity in 2014.

Key words: solar wind, spectra energy, chemical composition.