

ОБ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ И ВРЕМЕННЫХ ВАРИАЦИЯХ ПОТОКА СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ТИПА «МЕАНДР» И «ЩЕЛЬ»

В. И. Тулупов, Н. А. Власова,
Е. А. Чучков, С. И. Ермаков, Г. П. Любимов.

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына
Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова
ikt0840@mail.ru

Представлены результаты анализа вариаций потоков СКЛ 19.Ш.1990 и 14-15.ХП.2006 по экспериментальным данным с КА Гранат, ACE, Wind, STEREO-A и STEREO-B. Для анализа использованы модельные представления динамических структур в атмосфере Солнца и их продолжения в гелиосфере и эмпирическая «отражательная» модель движения, накопления и модуляции космических лучей. Найден структурный источник исследуемого явления в солнечной атмосфере. Выявлены характерные свойства явления в солнечном ветре и межпланетном магнитном поле. Сформулированы условия и причины наблюдения редкого явления – вариаций потока СКЛ типа «меандр» и «щель».

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Возрастание СКЛ 2.IX.1978

Щели на временных профилях потоков СКЛ были обнаружены по данным АМС *Венера-11* [Вернов и др., 1979]. В максимуме возрастаний потока СКЛ с энергией 3÷5 МэВ от вспышки?... наблюдаются вариации потока (рис. 0).

23 сентября 1978 года на АМС *Венера-11* была замечена особенность на максимуме временного профиля СКЛ – провал, который был назван «щель» [С.Н.Вернов, Б.А.Тверской, Н.Ф.Бородин, 1979].

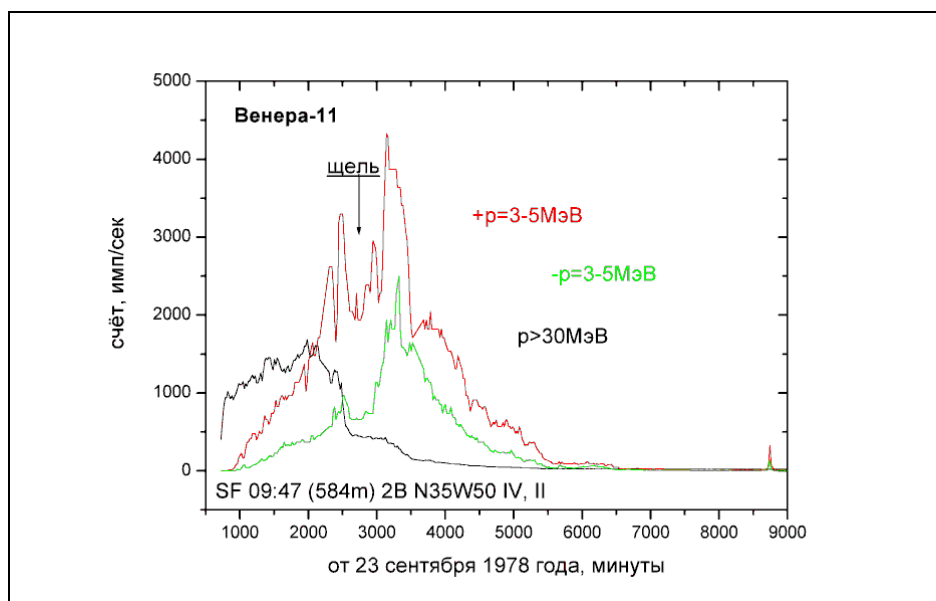


Рис. 0 Временной профиль потоков СКЛ по данным АМС Венера-11 23.IX.1978.

Источники информации о потоках СКЛ, использованных в данном исследовании, приведены в табл. 1.

Таблица 1.

КА	Орбита	Энергия
----	--------	---------

		протонов, МэВ
<i>Гранат</i>		1-2
<i>ACE</i> [www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/] [www.sec.noaa.gov/ftpdir/lists/ace]	Точка либрации L1 – 1.5 млн. км от Земли к Солнцу	>10 >30
<i>Wind</i> [http://wind.nasa.gov/mfi_swe_plot.php]	Вне магнитосферы Земли	19-28 28-72
<i>STEREO</i>		

Возрастание СКЛ 19-21.III.1990.

Возрастание потока СКЛ 19-21.III.1990 связывается со вспышкой 19.III.1990 с координатами N32W40. Особенность временного хода потока СКЛ состояла в том, что на фазе роста поток был модулирован не гармоническими, а разрывными колебаниями. Сдвиг фазы этих колебаний для потоков СКЛ от Солнца и к Солнцу составлял 180° (рис. 1). На фазе роста потока до максимума (более 20-и часов), наблюдалась затухающая осцилляция потока и знакопеременная осцилляция анизотропии потоков от Солнца и к Солнцу. Период осцилляций был около 3-х часов, по 20-минутным данным измерений. Амплитуда анизотропии убывала от $\pm 90\%$ до $\pm 20\%$ и зависела от энергии СКЛ. По 2-минутным данным фаза роста потока состояла из отдельных часовых противофазных импульсов. Регистрировались и одиночные 2-минутные импульсы. Моменты смены знака анизотропии, для протонов и альфа-частиц разных энергий, совпадали с точностью ± 1 минута.

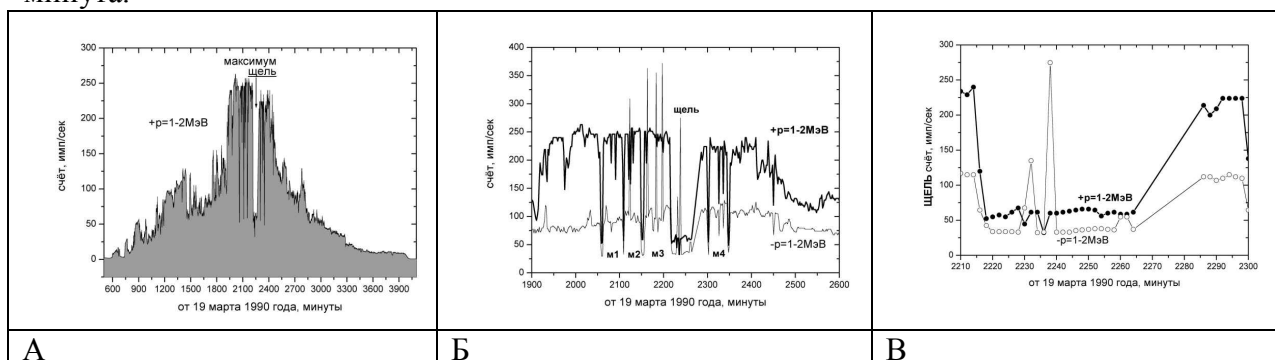


Рис. 1. Временные профили потоков протонов с $E=1-2$ МэВ, направленные к Солнцу (r^+ - толстая линия) и от Солнца (r^- - тонкая):
а) возрастание СКЛ 19-21.III.1990;
б) максимум: ...-...UT 20.III.1990;
в) щель: ...-...UT 20.III.1990

У возрастания 19-21.III.1990 хорошо заметна зеркальная симметрия профиля относительно максимума и локальный минимум «щель» на вершине (рис. 1а). В тонкой структуре хода интенсивности по 2-минутным данным хорошо заметны, примерно, часовые импульсы «меандры» разделённые «щелями» от 4-х до 8-и минут (рис. 1б). Плоские вершины этих импульсов имеют менее глубокие провалы (особенно на потоке к Солнцу) длительностью в 2 минуты. На вершине потока к Солнцу регистрируются отдельные пики (5 штук) длительностью в 2 минуты (рис. 1в).

Возрастание СКЛ 14-15.XII.2006.

Особенность события состоит в том, что в момент вспышки 14.XII.2006 в 22:06 UT с координатами S06W46 балла X3/2B в АО № 10930 с IV и II типами радиоизлучения АО была близка к точке соединения Солнца и Земли по спирали Архимеда. Возрастание потока СКЛ было крутым (рис.2). Вспышка 14.XII.2006 произошла на фоне мощного вспышечного выброса плазмы (ВВП) от предыдущей вспышки. Поэтому это событие, при беглом рассмотрении, не воспринимается, как самостоятельное, а принимается за модуляционный эффект на фоне спада события от вспышки 13.XII.2006. Малая относительная амплитуда события (один порядок) способствует такому восприятию. Однако, рентгеновские всплески вспышек 13 и 14.XII одинаковые. Малую эффективность потока СКЛ от вспышки 14.XII.2006 можно связать с его потерей при прохождении ВВП от вспышки 13.XII.2006. Новой инъекции соответствует жёсткий спектр фазы роста. Главной особенностью события была вариация временного профиля потока СКЛ – осцилляция в форме меандра.

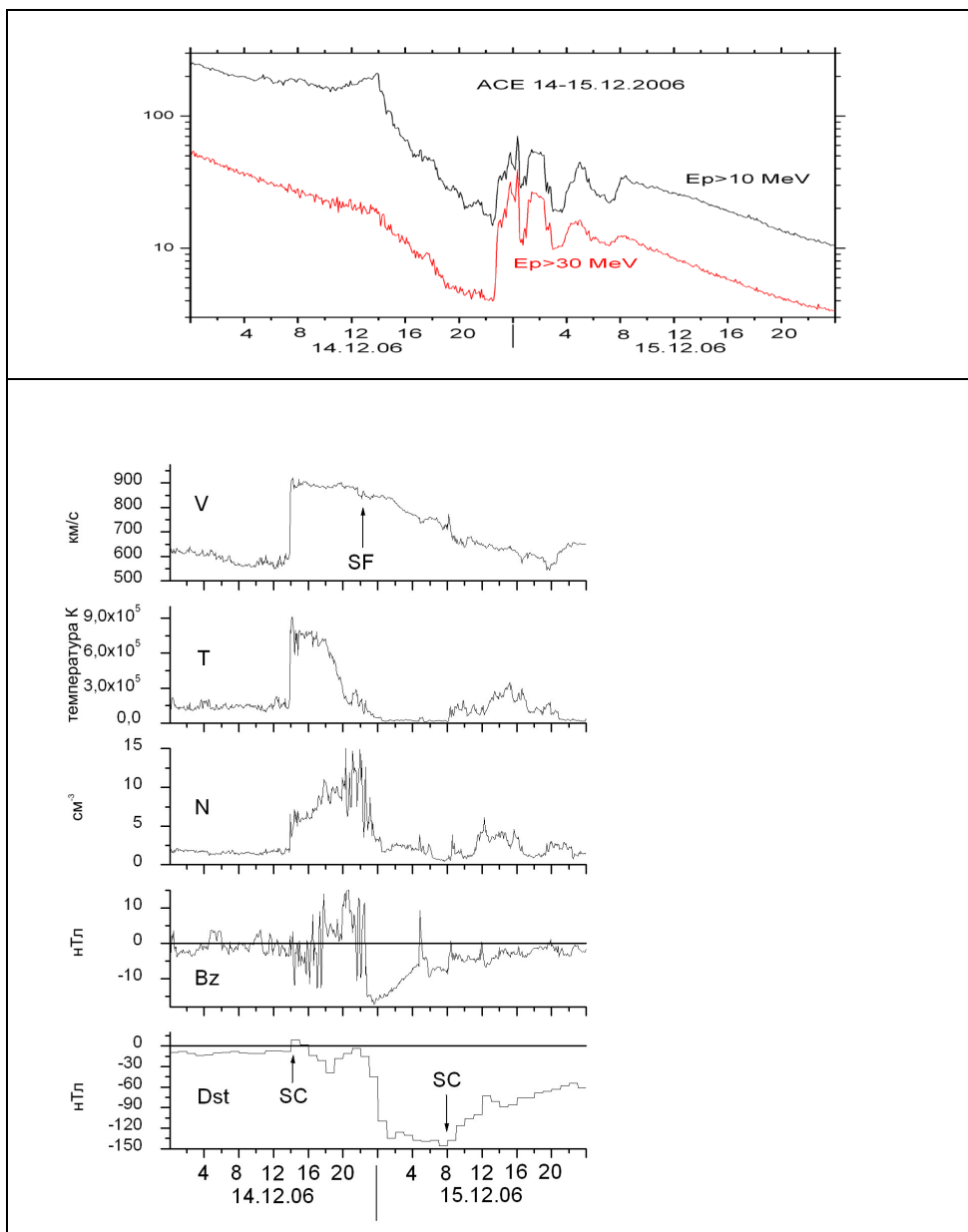


Рис. 2 Временные профили потоков СКЛ с энергией $>10 \text{ МэВ}$ и $>30 \text{ МэВ}$ по данным ИСЗ ACE и: скорости (V), температуры (T), плотности (N) СВ, модуля ММП (Bz) и Dst, 14-15.XII.2006.

Как было отмечено выше, ВВП был создан вспышкой 13.XII.2006. Примерно, к 02 UT 15.XII заканчиваются сильные возмущения плотности и поля (n , B) при высоком значении скорости плазмы (V). За 4 часа перед этим моментом на Солнце происходит новая вспышка. На графике скорости, на быстром спаде, есть чёткий пик, примерно, в 09 UT 15.XII, ему соответствует скачек плотности СВ. С этого момента после затухающей волны в форме меандра продолжается монотонный более медленный спад потока СКЛ. Можно предположить, что вариация типа «меандр» потока СКЛ аналогична модуляции СКЛ, наблюдаемой на ИСЗ *Гранат* 19-21.III.1990.

ОБСУЖДЕНИЕ

Межпланетная среда – дискретная неоднородная и нестационарная структура. В модельном представлении динамических структур в атмосфере Солнца и их продолжения в гелиосфере [13 Любимов Переслегина 1985] и эмпирической «отражательной» модели движения, накопления и модуляции космических лучей [21 Любимов 1988] могут быть объяснены особенности динамики потоков СКЛ.

19-21.III.1990 и 14-15.XII.2006 на временных профилях потоков СКЛ наблюдаются вариации типа «меандр» - чередование возрастаний и спадов (рис. 1 и рис. 2). Экспериментальным образом показано, что межпланетная среда - гелиосфера в высокой степени дискретна [12 Любимов и др. 1976]. Она состоит из плазменно-магнитных трубок и слоёв с размерами $(0.03-2) \cdot 10^6$ км на 1 а.е. Пучки таких трубок, заполненных СКЛ, движутся через детектор и воспринимаются как вариации потока указанных масштабов. Узкие минимумы солнечных протонов – «щели» соответствуют сильному магнитному полю на цилиндрической поверхности образующей трубку. Менее глубокие провалы потока протонов указывают на существование более тонкой структуры магнитного поля. Начальное заполнение трубок в момент вспышечного ускорения СКЛ зависит от их расположения и расстояний от места вспышки. Другим параметром являются свойства самих трубок – размеры, напряжённость магнитных полей, динамика плазмы (текущей в трубке и вне трубки). Поскольку трубки образуют петли, то их радиальный и спиральный размер (до вершины) определит начальную плотность частиц СКЛ в них. Важна ориентация трубок в среде по всем трём координатам. Дальнейшая заселённость и время жизни частиц определяются уже не пространственными, а временными характеристиками, зависящими от прозрачности трубок и энергетического спектра СКЛ.

Модуляция временного профиля потоков СКЛ однозначно связана со структурой ММП и плазмы СВ. Такими структурами во время солнечной активности на Солнце могут быть «бабочки» двух типов, описанных выше. Сечения проекций этих структур на детекторы СКЛ, при вращении вместе с Солнцем, будут соответствовать уменьшению потока СКЛ при сильных хромосферных магнитных полях и перенесённых солнечным ветром межпланетных магнитных полях и создавать «щели». Сильные солнечные магнитные поля расположены в теле «бабочек». Крылья «бабочек» дискретны и создадут менее глубокие «щели» в потоке СКЛ.

Обсудим фоновый поток СКЛ, к которому стремятся «щели». Это могут быть структуры стримеров типа полярных лучей от фоновой арочной структуры хромосферной сетки. Другая гипотеза относится к характеристике детектора. При интегральном спектре фон будет обусловлен частицами высоких энергий. Вклад дадут частиц ГКЛ и электроны СКЛ. И лишь дифференциальный спектр с высоким разрешением по энергии может дать картину дискретного потока типа «гребёнки».

Уменьшение анизотропии со временем связано с двумя процессами. Один процесс, это выход СКЛ из трубок за счёт дрейфовых движений и заполнения среды между трубками. Другой процесс связан с изменением фазового сдвига между потоками СКЛ от Солнца и к Солнцу.

Рассмотрим особенности регистрации СКЛ в марте и в сентябре. В эти периоды года широтные зоны активных центров одного из полушарий максимально приближены к

детектору. Следует различать два процесса – отображение структуры солнечной атмосферы в СВ и в ММП в окрестности детектора, и эффективность потока заряженных частиц СКЛ. При расположении детектора в прямой и в обратной ветвях меридианальной петли ММП, будут различаться условия регистрации анизотропии потока СКЛ. Заметим, что кроме межпланетной петли, активный центр (со вспышкой) связан с сопряжённой точкой другого полушария аркой в короне. Поэтому, заряженные частицы от вспышки приходят к детектору двумя путями - по межпланетной и корональной петлям (рис. 2) из [3].

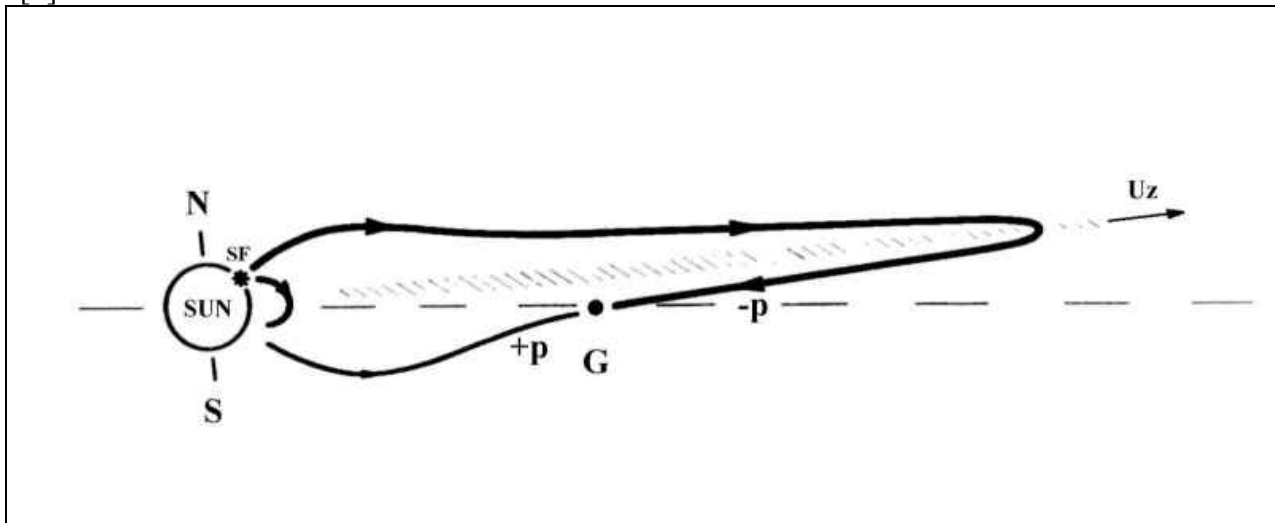


Рис. 3. Схема взаимного расположения межпланетной и корональной петель, мест солнечной вспышки (SF) и детектора (G) по «отражательной» модели для 19-21.ІІІ.1990

Расположение называется прямым, если солнечная вспышка и детектор соединены кратчайшим расстоянием. Это расположение соответствует случаю, когда вспышка и детектор находятся с одной стороны от экваториальной плоскости. Иначе говоря, точка соединения детектора с Солнцем и вспышка в этом случае расположены в одном полушарии. В этом случае поток частиц, идущий от Солнца, будет доминировать над потоком частиц идущих к Солнцу. Обратный поток будет запаздывать и больше рассеиваться, убывать на длинном пути. Отображаться будет структура вспышечного активного центра.

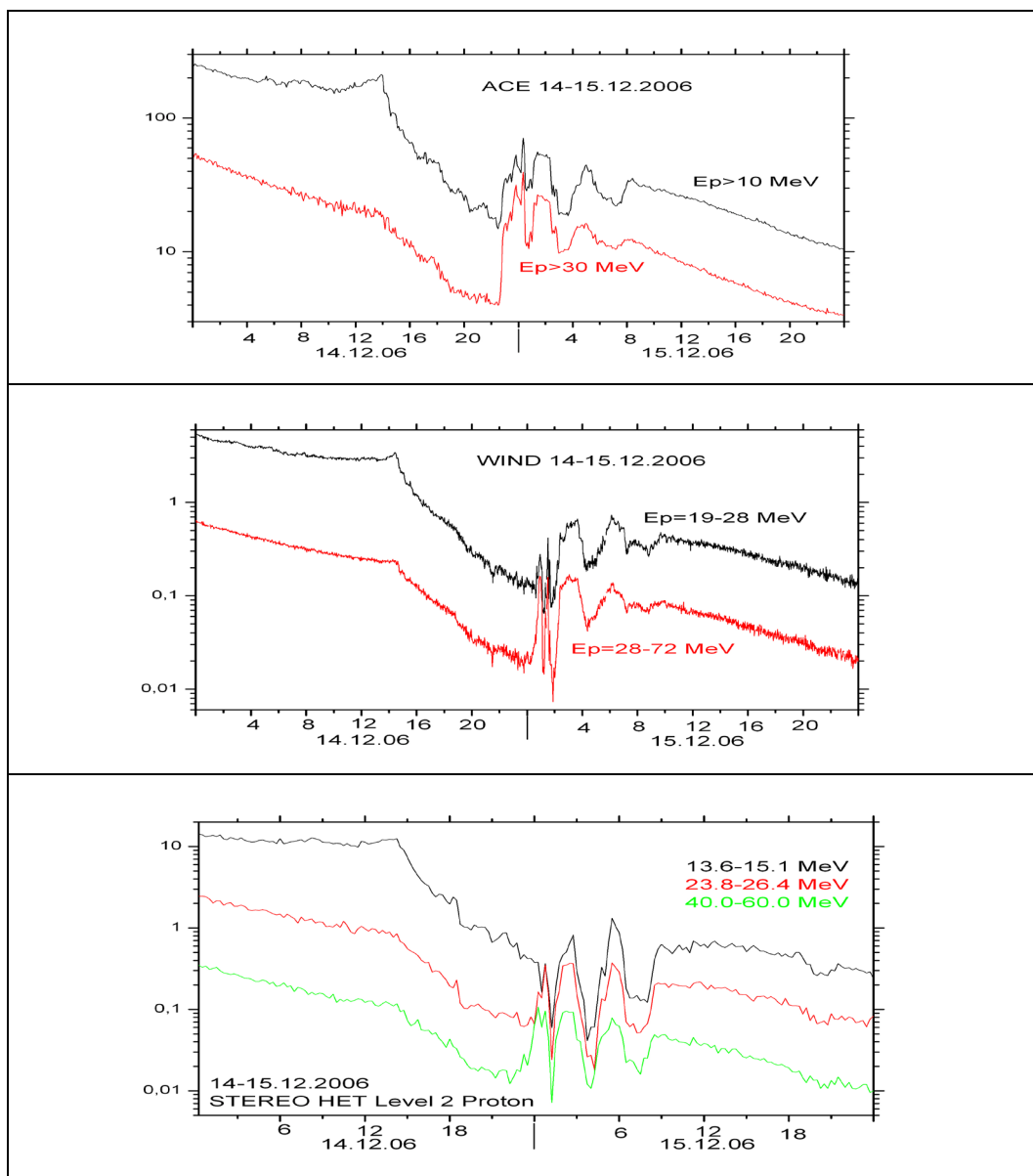
При обратном расположении вспышка и детектор будут находиться по разные стороны от экваториальной плоскости. Пути заряженных частиц СКЛ будут различаться не так сильно за счёт удлинения пути частиц от Солнца в сопряжённую точку по корональной арке и дрейфовых движений при переходах в основаниях петли и арки в короне. Нами было показано, что эти дрейфовые пути для протонов с энергией 1-4 МэВ могут составлять от 0.2 до 0.8 а.е. [8 Любимов и др. 1976]. Следовательно, обратное расположение вспышки и детектора будет более благоприятно для наблюдения знакопеременной анизотропии. Отображаться в СВ и ММП будет структура сопряжённого активного центра.

В событии 19-21.ІІІ.1990 года реализовалось сочетание нескольких факторов, позволивших «увидеть» эту весьма тонкую структуру ММП. Вероятно, в марте 1990 года, через детекторы ИСЗ «ГРАНАТ» прошла межпланетная система петель, перенесённая из хромосферы и короны «бабочка», удачно развёрнутая солнечным ветром. Мы сформулировали **главные условия для наблюдения** большой осциллирующей, знакопеременной анизотропии СКЛ. Время наблюдения, это дни весеннего и осеннего равноденствия, в марте и сентябре соответственно. Вспышка и детектор должны быть расположены по разные стороны от экваториальной плоскости, то есть их широты должны быть разного знака. Долгота вспышки должна быть западной и до точки

соединения детектора с Солнцем, то есть быть W40-W50 градусов. Временное разрешение регистрации СКЛ желательно иметь порядка одной минуты на фазе роста интенсивности (сутки), но меньше часа.

Обсудим различия в экспериментах и главные особенности данных. В 1990 и 2006 годах была разная солнечная активность и состояние межпланетной среды. В марте и в декабре вид Солнца в картинной плоскости существенно различен. Вспышка 19.03.90 имела координаты N32W40, а 14.12.06 – S06W46. По широте различие составляет 45° (N32+7+S06), а по долготе 6° (W46-W40). Различие по долготе можно связать с фазой роста СКЛ к максимуму в 1990 году. Но, возможно, существенным является другая, меридиональная ориентация АО в 2006 году.

Теперь перейдём к рассмотрению особенностей данных 2006 года. По данным ACE, WIND (рис. 4а,б) и STEREO (рис. 4в) есть различие формы, длительности и амплитуды вариаций «меандра». Однако главная особенность состоит в большом различии амплитуды «меандра» на STEREO-B от STEREO-A. Провалы потока, или как мы их назвали «щели», существенно меньше на STEREO-B. Это различие (до 85%) зависит от энергии СКЛ. Заметим, что до и после «меандра», потоки совпадают (рис. 4г). Следовательно, эффект может быть обусловлен размером трубок структуры. Ещё сильнее различие, и по форме, при сравнении потоков ионов в диапазоне 37.5-3000 кэВ, для направлений: от Солнца и к Солнцу, с Севера и с Юга.



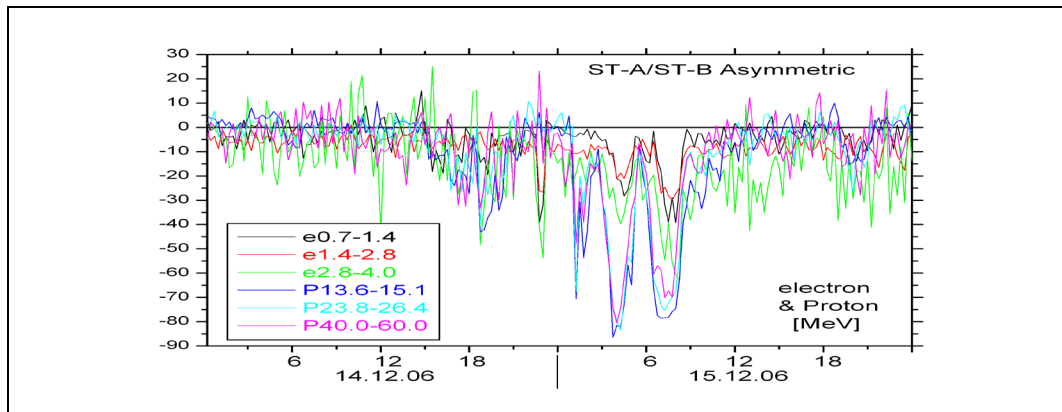


Рис. 4 Временные профили потоков протонов по данным КА ACE, WIND и STEREO-A и отношения потоков протонов: $J(\text{STEREO-A})/J(\text{STEREO-B})$

Телескоп высоких энергий имеет 3 дифференциальных интервала для электронов и 11 интервалов для протонов. Такой энергетический спектр, при временном разрешении 1 и 15 минут, позволяет весьма детально определить структуру «меандра». Другой телескоп ионов низких энергий имеет 32 дифференциальных интервала и позволяет определить анизотропию потока в двух направлениях – от Солнца и к Солнцу (в плоскости эклиптики) и – с Севера и с Юга (в меридиональной плоскости). Сочетание столь подробного энергетического спектра с выделенными направлениями потока открывает возможность определить пространственную ориентацию (диагностику) трубок СВ и ММП. Новая возможность определить размеры элементов структуры содержится в сравнении данных между STEREO-A и STEREO-B, поскольку они в это время расположены ещё очень близко друг к другу.

Солнечное направление варьирует мало, а северо-южное направление достигает 100% южной анизотропии (рис. 5). Этот эффект можно видеть уверенно на фоне шума, лишь для ионов с энергией 3000 кэВ. Причина может быть связана с размером трубок и с попаданием детектора в характерный размер при данной базе между ними. Траекторное различие между КА STEREO-A и STEREO-B, в это время, весьма мало. Однако оно может определять существенное различие данных при высокой дискретности структуры «меандра». В соответствие с траекторными данными КА STEREO-B был выше по широте относительно КА STEREO-A, примерно, на $5 \cdot 10^6$ км. Эта дистанция существенно больше максимального размера трубки ($0.03\text{-}2 \cdot 10^6$ км) по данным 19-21.III.1990. Для этого анализа мы выбрали лишь отдельные, наиболее яркие примеры, чтобы не загромождать статью.

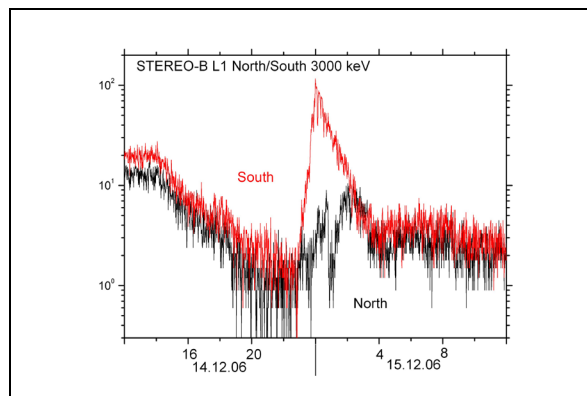


Рис. 5 Временные профили потоков протонов с $E=3$ МэВ, измеренные в направлении на север (толстая линия) и на юг (тонкая) по данным КА STEREO-B 14-15.XII.2006

Экспериментальное обнаружение плазменно-магнитных трубок – невероятно сложная задача. При исследовании свойств потоков плазмы СВ были найдены случаи

разрывов скорости и направления магнитного поля [15 Borovsky 2006]. По результатам анализа экспериментальных данных сделано заключение, что источник такой неоднородной структуры МС находится на Солнце, в соответствии с более ранними теоретическими представлениями [16 Parker 1964, 17 Neugebauer et al. 1995]. На основе статистического анализа относительных амплитуд вариаций различных параметров МС по 128 секундным данным с КА ACE за 7 лет измерений экспериментально доказано существование магнитных трубок, стенки которых ассоциировались с большими амплитудами вариаций ориентации ММП и вектора скорости СВ [18 Borovsky 2008].

Существуют подробные с разрешением 3 секунды измерения ММП 14-15.XII.2006 на КА WIND. На временном профиле величины модуля ММП (B_m) (рис. 6) хорошо заметны одиночные импульсы. Можно предположить, что они соответствуют более сильным магнитным полям на границах трубок. Наиболее богат на вариации временной профиль отношения величин V_x и V_y компонент ММП. Можно предположить, что изменения V_x/V_y соответствует границам трубок разных размеров. На профилях присутствует высокочастотный «шум» с размером 5% разделённый инверсными выбросами 20%. Около границ выбранного 6-и часового интервала, выбросы достигают 100%. Можно предположить, что эти быстрые выбросы магнитного поля соответствуют границам соприкасающихся трубок. В этом случае размеры скин-слоя будут составлять от 15 секунд для трубок с размером порядка часа и до 15 минут - для большой трубки. На всех этих рисунках видно, что большие и длительные вариации анизотропии рис. 6в. не есть широкий скин-слой большой трубки.

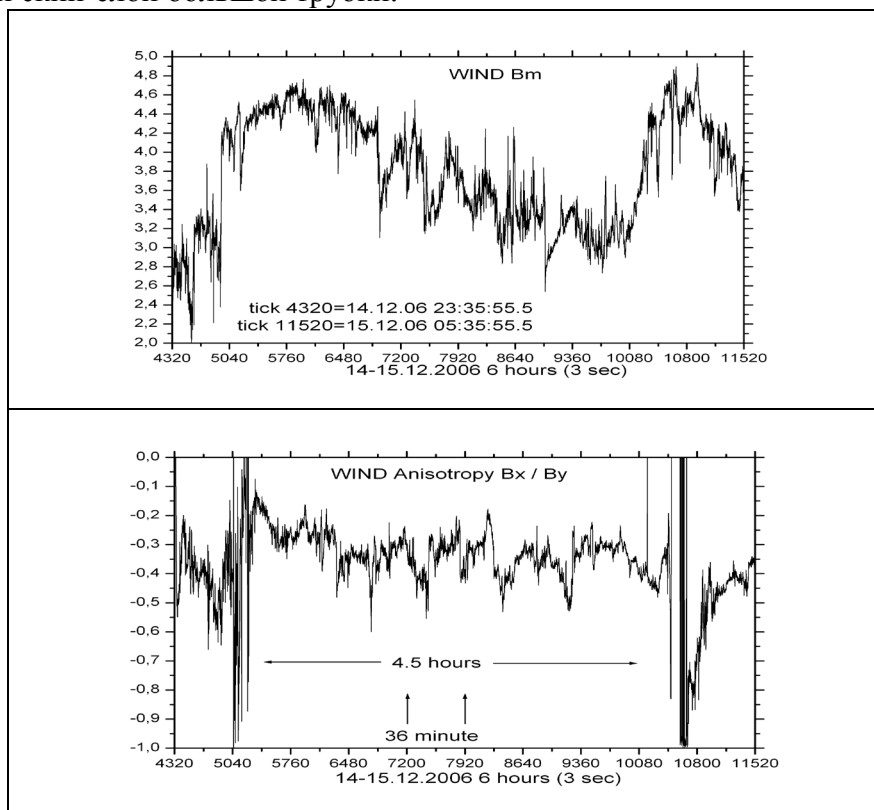


Рис. 6. Временные профили модуля (B_m) и отношения V_x/V_y ММП 14-15.XII.2006 по данным КА WIND

Обсуждение декабря 2006 года и сравнение Summary с нашим анализом.

1. Энергичные частицы инжектировались на Солнце в магнитное облако, в котором и достигли Земли.

Этот вывод нуждается в уточнении. Как видно на рис. 2, вспышка 14.12.2006 произошла на заднем фронте ВВП (облако) от вспышки 13.12.2006. Малую

эффективность потока СКЛ можно связать с его потерей при прохождении ВВП. Новой инжекции соответствует жёсткий спектр фазы роста.

2. Временные профили интенсивности солнечных частиц в этом событии, зарегистрированные на различных КА, демонстрируют как похожести, так и значительные различия.

Сходные выводы сделаны в пунктах 2 и 3, хотя они основаны на других модельных представлениях (и о структурах ММП и о движении СКЛ). В 1990 и 2006 годах была разная солнечная активность и состояние межпланетной среды. В марте и в декабре вид Солнца в картинной плоскости существенно различен. Но, возможно, существенным является другая, меридиональная ориентация АО в 2006 году.

3. Некоторые различия определяются положением и вращением КА и различием в направлениях зрения телескопов и анизотропией потоков частиц.

Выше, в пункте 2, мы уже отметили часть причин. Дополнительный анализ дан в анализе события при обсуждении рис. 4 и 5.

4. Вероятно, что прохождение Луны не оказывает большого эффекта.

5. Три больших провала в интенсивности потока протонов, которые видны на STEREO-A и в меньшей степени на Wind и ACE, похожи на падения, которые часто наблюдаются в импульсных событиях.

В любом «импульсном» событии столь быстрого спада не бывает. А здесь сказано, что «часто наблюдаются». Это странно - противоречие.

6. Эти три больших провала полностью содержатся внутри магнитного **облака**.

Сказано: «внутри магнитного облака», которое было создано вспышкой 13.12.2006 - они их связывают с этой вспышкой. И с особой структурой **облака**. Но тогда это противоречит пункту 7: «Направление и величина магнитного поля не проявляют существенных вариаций во время... провалов».

7. Направление и величина магнитного поля не проявляют существенных вариаций во время по крайней мере 2 из 3 провалов.

Выше об этом уже было сказано.

8. **Кажется**, что провалы соответствуют вариациям потоков тепловых электронов (по данным ACE/SWEPAM).

Звучит странно: «**кажется**, что...». У нас сказано: Событие, которое произошло 14-15 декабря 2006 года, **широко** рассматривалось на международном уровне. Там обращено внимание на «щели» нашего «меандра», которые названы “Dips”. Этот феномен привёл авторов презентаций к удивительной модели вспышечного выброса. Заметим, что вспышка 14.12.06 произошла после прохождения ВВП (от вспышки 13.12.06) на заднем его фронте. Следовательно «меандр» - “Dips” не связан с ВВП.

9. Три больших провала на Stereo-A полностью размываются на GOES 11. Это может быть связано с различием пути и времени достижения частицами GOES 11 в магнитосфере.

Этот пункт был отмечен в первых вариантах нашей с Вами Наташа статьи.

В предлагаемой работе сделана попытка проанализировать и дать объяснение сложному и многогранному явлению – вариациям потока СКЛ типа «меандр», которое имеет большое значение не только для изучения распространения и модуляции СКЛ в гелиосфере, но и для поиска нового в солнечно-земных связях. Не до конца объясненными остались, например, различия в тонкой структуре в начале вариаций - «меандр» потока СКЛ по данным КА ACE, WIND, STEREO 14-15.XII.2006. Существуют вопросы, требующие ответов. Почему на фоне монотонного спада потока СКЛ от большинства западных вспышек нет модуляции-осцилляции?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Особенности и характерные параметры вариаций потоков СКЛ (осцилляций типа «меандр» и «щель») 19-21.III.1990 и 14-15.XII.2006 в рамках модельного представления динамических структур в атмосфере Солнца и их продолжения в гелиосфере и эмпирической «отражательной» модели движения, накопления и модуляции космических лучей можно интерпретировать как регистрацию в межпланетной среде системы петель ММП. Структура типа «бабочки» в солнечном магнитном поле может быть источником плазменно-магнитных трубок, наполненных СКЛ. **При удачном расположении** вспышки на Солнце и детектора возможно наблюдение редких явлений типа вариаций потока – «меандр».

Можно сформулировать главные условия для наиболее вероятного наблюдения большой осциллирующей, знакопеременной анизотропии СКЛ: время наблюдения - дни весеннего и осеннего равноденствия, в марте и сентябре соответственно; вспышка и детектор должны быть расположены по разные стороны от экваториальной плоскости, то есть их широты должны быть разного знака; вспышка должна находиться на западной полусфере Солнца и ближе к центральному меридиану, чем точка соединения детектора с Солнцем по спирали Архимеда, то есть одна координата вспышки должна быть $W40^{\circ}$ - $W50^{\circ}$; временное разрешение регистрации СКЛ желательно иметь порядка одной минуты на фазе роста потока СКЛ. Мы хотим добавить, что **любая** вспышка населяет частицами СКЛ пространственные структуры в атмосфере Солнца и их продолжения в МС, а условия их наблюдения в гелиосфере, рализуются гораздо реже.

Событие 14-15.XII.2006 наблюдалось вопреки сформулированным условиям, что свидетельствует о необходимости дальнейших исследований редких явлений в межпланетной среде.

При построении любых моделей необходимо соблюдать причинно-следственные процессы преобразования энергии [16].

Благодарности

Следует вспомнить историю эксперимента на ИСЗ *Гранат*. Н.Н. Контор предложил и организовал проект мониторингового прибора для серии высоко апогейных ИСЗ. Действующий макет прибора разработал и осуществил С. А. Филиппычев. Он создал автономную электронную схему с дублированием процессоров и с переключением времени опроса детекторов в зависимости от уровня интенсивности. Е. А. Чучков осуществил все фазы эксперимента и убедил научное руководство эксперимента на ИСЗ *Гранат* в необходимости радиационного контроля. В результате группа управления ИСЗ *Гранат* и основным советско-французским научным экспериментом обнаружила связи эффектов мощных солнечных вспышек с функционированием ИСЗ и научной аппаратуры. Велось регулярное оперативное управление всем экспериментом *Гранат* и включением научной аппаратуры с целью их защиты от воздействия солнечной вспышечной радиации. Программный комплекс обработки научной информации создал и осуществил Н.Н. Павлов.

Выражаем признательность А.Б. Струминскому за полезную информацию о зарубежных исследованиях событий в декабре 2006 года по данным КА *STEREO* и *Wind* и за ознакомление с новой информацией высокого аппаратного пространственного, временного и энергетического разрешения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Паркер Е. Н. Динамические процессы в межпланетной среде // Под ред. Л.И. Дормана, М.:МИР, 1965.
2. Дорман Л.И., Мирошниченко Л.И. Солнечные космические лучи // М.: Физматгиз, 1968.

3. *Топтыгин И.Н.* Космические лучи в межпланетных магнитных полях // М.: Наука, 1983
4. *Reames, D.V., Ng C.K., Berdichevsky D.* Angular Distributions of Solar Energetic Particles // *Astrophys. J.* 2001. V. 550. P. 1064-1074.
5. *Reames D.V.* Particle Acceleration at the Sun and in the Heliosphere // *Space Sci. Rev.* V. 90. P.413-491. 1999.
6. *Cane H. V., Reames D. V., von Roseninge T. T.* The Role of Interplanetary Shocks in the Longitude Distribution of Solar Energetic Particles // *J. Geophys. Res.* 1988. V. 93. N. A9. P. 9555–9567.
7. *Cliver E., Klecker B., Kallenrode M.-B., Cane H.* Researchers Discuss Role of Flares and Shocks in ssolar Energetic Particle Events // *Eos Trans. AGU.* 2002. V. 83. N 12. P. 132.
8. *Lupton J. E., Stone E. C.* Solar Flare Particle Propagation: Comparison of a new Analytic Solution with Spacecraft Measurements // *J. Geophys. Res.* 1973. V. 78. N 7. P. 1007-1018.
9. *McCracken K. G., Ness N. F.* The Collimation of Cosmic Rays by the Interplanetary Magnetic Field // *J. Geophys. Res.* 1966. V. 71. N 13. P. 3315.
10. *Bartley W. C., Bakata R. P., McCracken K. G., Rao U. R.* Anisotropic Cosmic Radiation Fluxes of Solar Origin // *J. Geophys. Res.* 1966. V. 71. P. 3297.
11. *Bruno R., Carbone V., Veltri P. et al.* Identifying Intermittency Events in the Solar Wind // *Planet. Space Sci.* 2001. V. 49. P. 1201.
12. *Любимов Г. П., Контор Н. Н., Переслегина Н. В., Игнатъев П. П.* Анизотропия солнечных протонов и неоднородности межпланетной среды // *Известия АН. Сер. физ.* 1976. Т. 40. № 3. С. 462.
13. *Любимов Г. П., Переслегина Н. В.* Отображение структуры хромосферы и короны Солнца в солнечном ветре и межпланетном магнитном поле // *Астрономический журнал.* 1985. Т. 62. Вып. 4. С. 780.
14. *Ермаков С. И., Контор Н. Н., Любимов Г. П. и др.* Вспышка солнечных космических лучей в марте 1990 г. // *Известия АН СССР. Сер. физ.* 1991. Т. 55. № 10. С.1889.
15. *Borovsky J. E* The Eddy Viscosity and Flow Properties of the Solar Wind: CIRs, CME Sheaths, and Solar-Wind Magnetosphere Coupling // *Phys. Plasmas.* 2006. V. 13. P. 056505.
16. *Parker E. N.* Dynamical Properties of Stellar Coronas and Stellar Winds. Part III: The Dynamics of Coronal Streamers // *Astrophys. J.* 1964. V. 139. P. 690.
17. *Neugebauer M., Goldstein B. E., McComas D. J. et al.* Ulysses Observations of Microstreams in the Solar Wind from Coronal Holes // *J. Geophys. Res.* 1995. V. 100. P. 23,389.
18. *Borovsky J. E.* Flux Tube Texture of the Solar Wind: Strands of the Magnetic Carpet at 1 AU? // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. P. A08110. doi:10.1029/2007JA012684.
19. *Fisk L. A.* The Open Magnetic Flux of the Sun. Part I: Transport by Reconnections with Coronal Loops // *Astrophys. J.* 2005. V. 626. P. 563.
20. *Mellor C., Gerrard C. L., Galsgaard K. et al.* Numerical Simulations of the Flux Tube Tectonics Model for Coronal Heating // *Sol. Phys.* 2005. V. 227. P. 39.
21. *Любимов Г.П.* Отражательная модель движения СКЛ в петлевых ловушках // *Астрономический циркуляр АН СССР.* 1988. № 1531. С. 1916.
22. *Любимов Г. П., Григоренко Е. Е.* Об отражательной модели солнечных космических лучей // *Космич. исслед.* 2007. Т. 45. № 1. С. 12. (Cosmic Research. P. 9)
23. *Любимов Г.П.* СКЛ малых энергий в неоднородной межпланетной среде // *Труды IX ленинградского семинара по космофизике,* Ленинград: АН СССР. 1977. С. 213.
24. *Ermakov S.I., Kontor N.N., Lyubimov G.P.* Reflection Model of Solar Cosmic Ray Propagation // *21th ICRC.* Australia. Adelaide. Conference papers. 1990. V. 5. С. 213.
25. *Григоренко Е.Е., Любимов Г.П.* Использование отражательной модели для анализа

возрастаний интенсивности СКЛ на различных гелиоцентрических расстояниях на примере события, наблюдавшегося в июне 1991 г. на КА *Гранат* и *Ulysses* // Космич. исслед. 2004. Т. 42. № 3. С. 228. (Cosmic Research. P. 219)

26. Любимов Г.П., Тулунов В.И. Серия протонных вспышек в июле 1985 г. по наблюдениям на ИСЗ *Прогноз-10* и АМС *Вега-1, 2* // Космич. исслед. 2003. Т. 41. № 1. С. 23. (Cosmic Research. in Russian)
-