

## АСТРОНОМИЯ, АСТРОФИЗИКА И КОСМОЛОГИЯ

**Вариации потока солнечных космических лучей типа «меандр» и «щель»**Г. П. Любимов, В. И. Тулупов<sup>а</sup>, Н. А. Власова*Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына,  
Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова.**Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.**E-mail: <sup>а</sup>iki0840@mail.ru*

Статья поступила 17.04.2014, подписана в печать 28.05.2014.

Представлены результаты исследования природы вариаций потоков солнечных космических лучей (СКЛ) типа «меандр» и «щель» на примере событий 19.III.1990 и 14–15.XII.2006. Используются экспериментальные данные с космических аппаратов (КА) ГРАНАТ, ACE, Wind, STEREO-A и STEREO-B. Анализ основан на наблюдательных данных динамических структур в атмосфере Солнца и их продолжения в гелиосфере и эмпирической «отражательной» модели движения, накопления и модуляции космических лучей. Обсуждается структурный источник этих вариаций на Солнце в виде дискретных магнитных плазменных петель и арок между активными областями. Такие структуры в форме магнито-плазменных трубок, перенесенные из хромосферы и короны и заполненные СКЛ, вращаются вместе с Солнцем и при пересечении области расположения детектора являются причиной наблюдения пространственно-временных вариаций СКЛ типа «меандр» и «щель».

*Ключевые слова:* солнечные вспышки, солнечные космические лучи, межпланетное магнитное поле.

УДК: 523.62-726, 523.62-337. PACS: 96.50.Vg; 96.50.Bh.

**Введение**

Явления, регистрируемые в межпланетной среде (МС), являются отражением процессов, происходящих на Солнце. Любые наблюдаемые вариации потоков СКЛ определяются параметрами источника частиц и условиями распространения частиц в неоднородной межпланетной среде. СКЛ служат инструментом для исследования структуры и состояния межпланетного магнитного поля (ММП), плазмы солнечного ветра (СВ) и их источников на Солнце [1, 2]. Одним из таких видов вариаций являются осцилляции потока СКЛ с периодом  $\sim 1$  ч, названные нами «меандр» (извилистый, по имени реки Меандра, известной по необыкновенным изгибам) и впервые обнаруженные нами во время события возрастания СКЛ 19–21.III.1990 на ИСЗ ГРАНАТ [3–5].

Осцилляции потока СКЛ типа «меандр» после солнечной вспышки 14.XII.2006 были зарегистрированы сразу на нескольких КА: ACE, Wind, STEREO-A, B. За рубежом состоялась специальная конференция, посвященная изучению этого события [6–8]. Это событие было описано и исследовано в модельном представлении самостоятельного явления в изолированной структуре МС, называемой «магнитное облако». Мы вынуждены отметить факт полного отсутствия ссылок в этих публикациях на наши работы, в которых гораздо раньше было обнаружено и детально исследовано уже упомянутое аналогичное событие 19–21 марта 1990 г.

Мы в работе [9] показали общность явлений типа «меандр» 19–21.III.1990 и 14–15.XII.2006 в едином модельном представлении динамических структур в атмосфере Солнца и их продолжения в гелиосфере, отраженном в эмпирической «отражательной» модели

движения, накопления и модуляции космических лучей [10].

В предлагаемой статье мы вновь акцентируем внимание на этой новой форме и ее значимости для изучения распространения и модуляции СКЛ в гелиосфере и для поиска нового в солнечно-земных связях. В работе приводится более подробное описание и объяснение вариаций потоков СКЛ типа «меандр» на примере событий 19–21.III.1990 и 14–15.XII.2006.

**Экспериментальные данные**

Для исследования использовались измерения потоков СКЛ, напряженности межпланетного магнитного поля (ММП), параметров плазмы солнечного ветра с космических аппаратов ГРАНАТ, ACE, Wind и STEREO-A, B, которые в рассматриваемые периоды времени находились вне земной магнитосферы и были расположены на различных, но близких, гелиоцентрических расстояниях [<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>]. Данные с различных КА не противоречат друг другу, что позволяет расширить диапазон исследования по энергии частиц, а также по временному и пространственному разрешению их потоков.

**Возрастание СКЛ 19–21.III.1990.** Подробный анализ данного события, зарегистрированного на ИСЗ ГРАНАТ, представлен в работах [4, 5]. Возрастание потока СКЛ 19–21.III.1990 связывается со вспышкой 19.III.1990 с началом в 04.38 UT балла X1.5/1B с координатами N32W40. Особенность временного хода потока СКЛ состояла в том, что на фазе роста потока до максимума наблюдалась осцилляция типа «меандр» и знакопеременная осцилляция анизотропии потоков от Солнца и к Солнцу. Поток был модулирован не гармоническими, а разрывными колебаниями. Сдвиг

фазы этих колебаний для потоков СКЛ от Солнца и к Солнцу составлял  $180^\circ$ . Период осцилляций был около трех часов. Амплитуда анизотропии убывала от  $\pm 90$  до  $\pm 20\%$  и зависела от энергии СКЛ. Фаза роста потока состоит из отдельных часовых противофазных импульсов. Регистрировались и одиночные двухминутные импульсы. Моменты смены знака анизотропии для протонов и альфа-частиц разных энергий совпадают с точностью  $\pm 1$  мин. Отмеченные выше особенности и их параметры указывали на регистрацию в межпланетной среде системы петель ММП. Такая структура должна была иметь адекватную форму в солнечном магнитном поле.

**Возрастание СКЛ 14–15.XII.2006.** Возрастание СКЛ явилось следствием вспышки 14.XII.2006 в 22:15 UT с координатами S05W46 балла X3/2B в АО № 10930 с IV и II типами радиоизлучения [http://www.wdcb.ru]. Возрастание было зарегистрировано на КА ACE, WIND, STEREO-A, B. (рис. 1). Оно произошло на фоне спада потока СКЛ от вспышки 13.XII.2006 (02.40 UT) в той же АО. Главной особенностью события была вариация временного профиля потока солнечных протонов — осцилляция типа «меандр», т. е. чередование подъемов и спадов в максимуме возрастания потоков 14–15.XII.2006.

## Обсуждение

В основе модельных представлений рассматриваемых явлений лежат предсказанные и экспериментально обнаруженные магнитоплазменные трубки. Плазма в магнитном поле преобразует форму магнитной трубки за счет локальных ларморовских токов плазмы. Плазма вытесняет магнитное поле с оси трубки к ее краям, создает тонкий токовый скин-слой в виде кольца, разделяющий магнитное поле, и плазменный шнур (пинч) на оси [11, 12]. Такие трубки с СКЛ были впервые обнаружены в [13].

Экспериментально обнаруженные межпланетные петли магнитоплазменных трубок впервые показаны в [14]. Они были вытянуты рекуррентным квазистационарным потоком плазмы солнечного ветра из активных областей Солнца, в одной из которых произошла вспышка, заселившая их СКЛ. Показано, что это сечения межпланетных петлевых трубок ММП с плазмой длиной до 6 а.е. В спокойном СВ и в ММП впервые были найдены большие квазистационарные дублетные и мультипетельные структуры [15]. По анализу знакопеременной анизотропии СКЛ были определены возможные параметры дискретных трубок ММП. Фундаментальным пространственным образова-

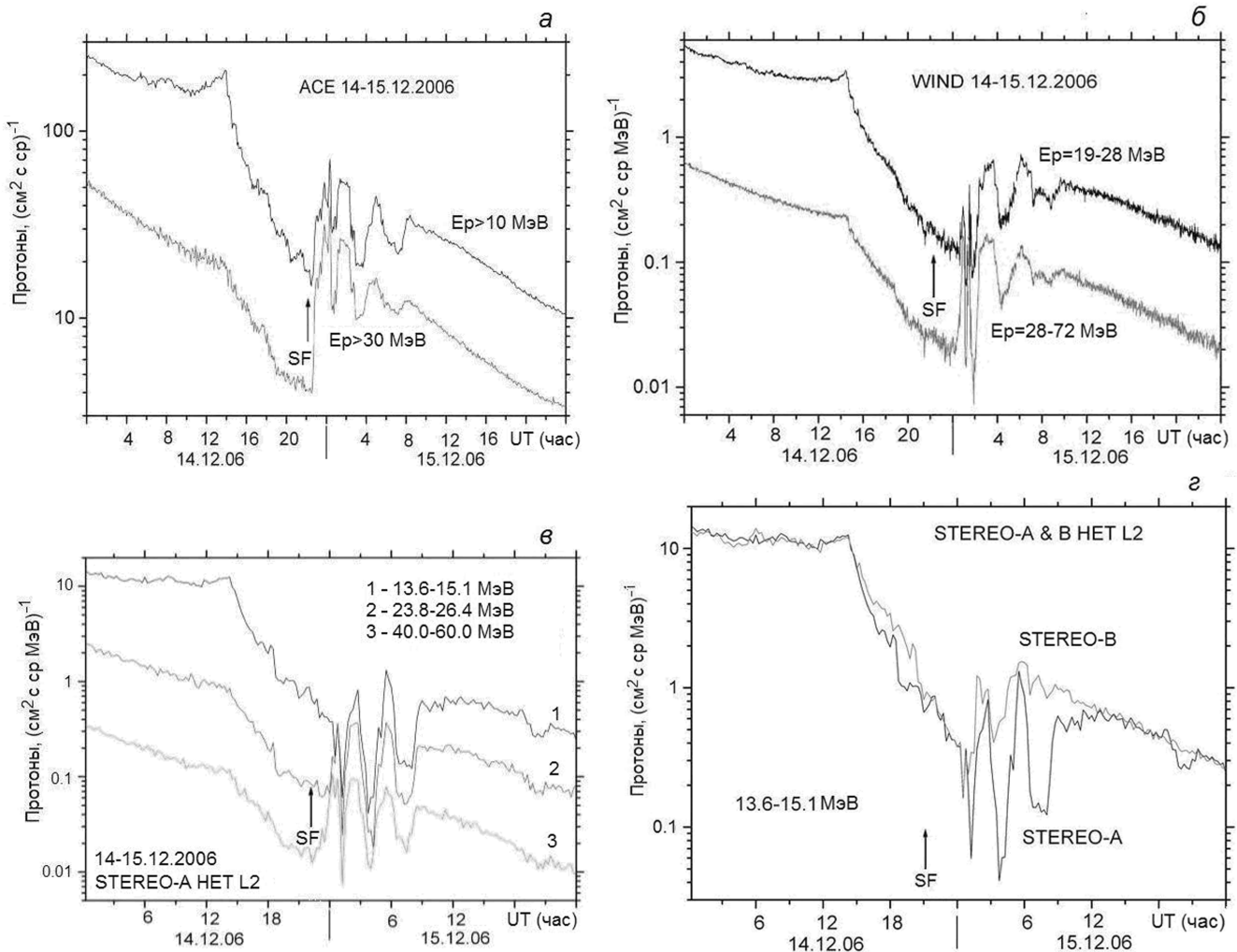


Рис. 1. Временные профили потоков протонов по данным КА ACE, WIND, STEREO-A, B 14–15.XII.2006

нием является магнитная трубка (минимум поля на оси), с характерным размером  $(0.5 \div 2) \cdot 10^6$  км и с минимальным  $0.03 \cdot 10^6$  км на 1 а. е. [5].

Особенности вариаций потоков СКЛ, наблюдаемые 14–15.III.2006 и 19–21.III.1990, были объяснены в модельном представлении динамических структур в атмосфере Солнца и их продолжения в гелиосфере [15] и эмпирической «отражательной» модели движения, накопления и модуляции космических лучей [10]. Магнитные поля активных областей на Солнце создают структуры петель и арок, соединяющих их с соседними активными областями [16]. Одним из основных физических принципов, заложенных в основу «отражательной» модели, является постулат, что распространение СКЛ в МС происходит в квазистационарных петлевых структурах ММП разного масштаба, которые вытягиваются солнечным ветром в гелиосферу, вращаются вместе с Солнцем и могут быть ориентированы в различных плоскостях. Петлевые структуры могут быть собраны в пучки в соответствии с расположением их оснований на Солнце и перераспределены в МС за счет динамических процессов в СВ. Пучки таких трубок, заполненных СКЛ, движутся через детектор и воспринимаются как вариации потока указанных масштабов. Начальное заполнение трубок в момент вспышечного ускорения СКЛ зависит от их расположения и расстояний от места вспышки. Другим параметром являются свойства самих трубок — размеры, напряженность 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. Дальнейшая заселенность и время жизни частиц определяются уже не пространственными, а временными характеристиками, зависящими от прозрачности трубок и энергетического спектра СКЛ.

Модельные представления о захвате и переносе СКЛ в полупрозрачных ловушках дают возможность объяснить недиффузионные формы временных профилей потоков СКЛ и установить связи возрастаний потоков со вспышками на Солнце. Существенным для формы временного профиля является положение источника на Солнце (долгота и широта) и взаимное расположение детектора относительно Солнца (положение точки соединения), а также состояние МС.

**О модели «меандра» в межпланетной среде и на Солнце**

У возрастания 19–21 марта хорошо заметна зеркальная симметрия профиля относительно максимума и локальный глубокий минимум — «щель» — на вершине (рис. 2, а).

В тонкой структуре хода интенсивности этого участка по двухминутным данным хорошо заметны примерно часовые импульсы — «меандры», разделенные «щелями» от 4 до 8 мин (рис. 2, б). Плоские вершины этих импульсов имеют менее глубокие провалы (особенно на потоке к Солнцу) длительностью в 2 мин. Такая дискретная структура потока солнечных протонов малой энергии адекватна трубкам ММП с плазмой СВ, обнаруженная нами ранее [14, 15]. Узкие минимумы солнечных протонов — «щели» — соответствуют

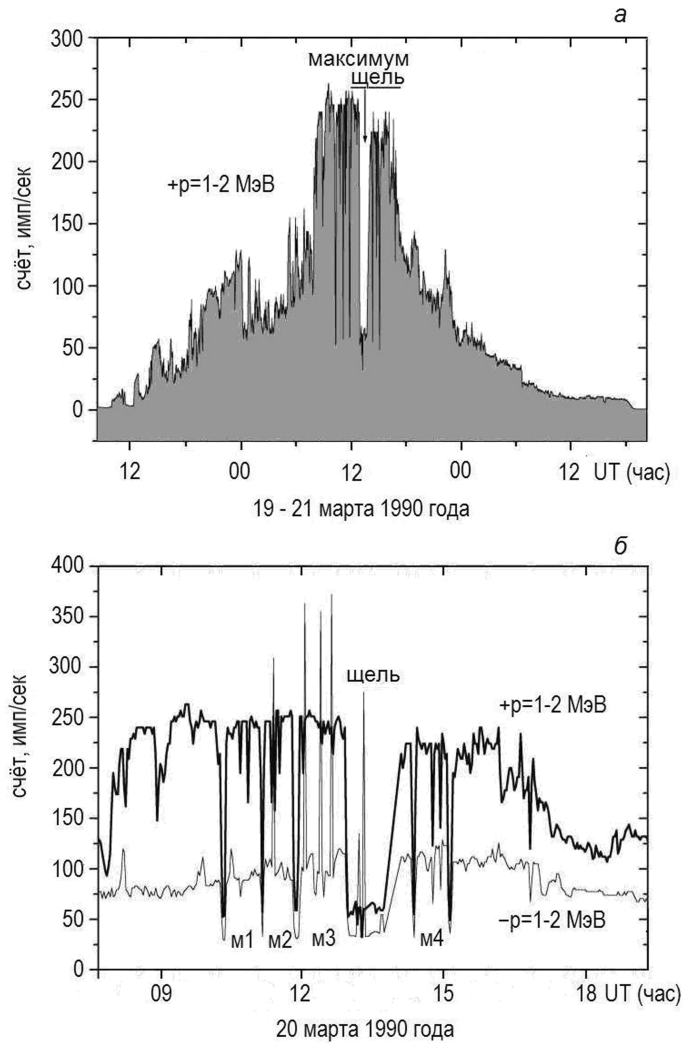


Рис. 2. Временной профиль возрастания СКЛ 19–21 марта 1990 г.: а — протоны 1–2 МэВ 19–21.III.90 г., выделены максимум и «щель»; б — максимум потоков протонов 1–2 МэВ 20.III.90 г. от Солнца (+p) и к Солнцу (–p); выделены локальные максимумы ( $m_1$ – $m_4$ ) и «щель» (из работы [5])

сильному магнитному полю на цилиндрической поверхности, образующей трубку. Менее глубокие провалы потока протонов указывают на существование более тонкой структуры магнитного поля.

В соответствии с особенностями потока СКЛ, вспомним детали фотографий Солнца, сделанные станцией SKYLAB с 29 мая по 27 ноября 1973 г. в диапазоне  $2\text{--}32 \text{ \AA}$  и  $44\text{--}54 \text{ \AA}$  [16]. Мы, изучая снимки, обратили внимание на форму дискретных магнитных, плазменных петель АО и арок между ними. Петли АО четко были разделены на две части, на два лепестка. Они напоминали нам «бабочку» [17]. Особенно хорошо эти системы видны в деталях и в динамике на снимках и фильмах по данным SOHO и TRACE в линиях 171 и  $195 \text{ \AA}$ . В этих динамических структурах хорошо видна высокая дискретность и широкий спектр масштабов магнитного поля и плазмы. Вспышка возникает, начинается в центральной части АО (в теле «бабочки»), между ее локальными магнитными полюсами. Вероятно, в марте 1990 г. через детекторы ИСЗ ГРАНАТ

прошла межпланетная система петель, перенесенная из хромосферы и короны «бабочка», удачно развернутая солнечным ветром.

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

Следует различать две стороны регистрации СКЛ — отображение структуры солнечной атмосферы в СВ и в ММП в окрестности детектора и эффективность потока заряженных частиц СКЛ. При расположении детектора в прямой или в обратной ветвях межпланетной петли ММП будут различаться условия регистрации анизотропии потока СКЛ. Заметим, что кроме межпланетной петли активный центр (со вспышкой) связан с сопряженной точкой другого полушария (сопряженный активный центр) — аркой в короне. Поэтому заряженные частицы от вспышки приходят к детектору двумя путями — по межпланетной и корональной петлям (рис. 3).

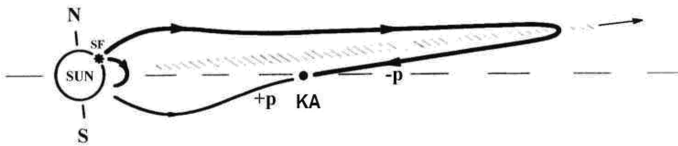


Рис. 3. Схема межпланетной и корональной петель магнитного поля, вспышки SF и положения космического аппарата КА в марте 1990 г.

Мы называем расположение прямым, если солнечная вспышка и детектор соединены кратчайшим расстоянием. В этом случае поток частиц, идущих 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 соединены межпланетной петлей и аркой в короне. Пути заряженных частиц СКЛ по прямой и обратной ветвям ММП будут различаться не так сильно за счет удлинения пути частиц от Солнца в сопряженную 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. [14]. Следовательно, обратное расположение вспышки и детектора будет более благоприятно для наблюдения знакопеременной анизотропии. Отображаться в СВ и ММП будет структура сопряженного активного центра.

Мы сформулировали главные условия для наблюдения большой осциллирующей, знакопеременной анизотропии СКЛ. Долгота вспышки должна быть западной

и до точки соединения детектора с Солнцем, т.е. W40–W50 градусов. Временное разрешение регистрации СКЛ желательно иметь порядка одной минуты на фазе роста интенсивности. Уменьшение анизотропии со временем связано с двумя процессами. Один процесс, это выход СКЛ из трубок за счет дрейфовых движений и заполнения среды между трубками. Другой процесс обусловлен изменением фазового сдвига между потоками СКЛ от Солнца и к Солнцу, связанного с изменением длин прямой и обратной ветвей петель ММП и дисперсией частиц СКЛ по скоростям.

### Солнечная активность и межпланетная среда 14 и 15 декабря 2006 г.

В декабре 2006 г. наблюдались особенности солнечной активности, состояния межпланетной среды и потока СКЛ. Особенный интерес представлял поток СКЛ в форме «меандра» от вспышки 14 декабря 2006 г. в 22:15 UT с координатами S05W46 балла X3/2B в АО № 10930 с IV и II типами радиоизлучения.

Рассмотрим данные космических аппаратов ACE для  $E_p > 10$  МэВ и  $E_p > 30$  МэВ и WIND для  $E_p = 19–28$  МэВ и  $E_p = 28–72$  МэВ, которые в это время находились в точке либрации  $L_1$  на расстоянии примерно  $1.5 \cdot 10^6$  км от Земли в сторону Солнца (рис. 1, а, б). АО № 10930, в которой произошла вспышка, была близка к точке соединения Солнца и Земли по спирали Архимеда. Поэтому возрастание потока СКЛ было крутым. Вспышка 14.XII произошла на фоне мощного вспышечного выброса плазмы от вспышки 13.XII.2006 (02.40 UT) с координатами S06W24 балла X3.4/4B с IV и II типами радиоизлучения в той же АО № 10930. Поэтому возрастание от вспышки 14.XII при беглом рассмотрении не воспринимается как самостоятельное событие, а принимается за модуляционный эффект на фоне спада события от вспышки 13.XII. Малая относительная амплитуда события (один порядок величины) способствует такому восприятию. Однако рентгеновские всплески вспышек одинаковы. Инжекции соответствует жесткий спектр фазы роста. Осцилляции потока солнечных протонов типа «меандр», т.е. чередование подъемов и спадов, наблюдались в максимуме возрастания 14–15.XII.

Как свидетельствуют данные о потоках протонов СКЛ других энергий (от единиц кэВ до десятков МэВ) и ионов различных химических элементов с тех же космических аппаратов, времена пиковых значений потоков и провалов между ними совпадают. Все это является прямым доказательством дискретной пространственной структуры ММП. Пиковые значения соответствуют прохождению через детектор внутренних областей трубок ММП, заселенных частицами СКЛ. С обеих сторон они ограничены участками спада интенсивности к минимальным значениям — «щелям». Если предположить, что участки с пиковыми значениями интенсивности соответствуют диаметру трубок, то получим хорошее согласие с расчетом в работах [5, 13]: диаметр трубок на 1 а. е. от Солнца  $\sim 3.5 \cdot 10^6$  км. Мы полагаем, что вариация типа «меандр» потока СКЛ 14–15.XII аналогична модуляции СКЛ, наблюдаемой на ИСЗ ГРАНАТ 19 марта 1990 г. В обоих событиях реализовалась уникальная ситуация в среде.

**Особенности динамической структуры в СВ и ММП 14–15 декабря 2006 г.**

Обсудим данные параметров МС и ММП за 14 и 15 декабря. В период 14–15.XII.2006 параметры МС были зарегистрированы на нескольких КА. На рис. 4 представлен временной ход интенсивностей потоков протонов с  $E_p > 10$  МэВ и  $E_p > 30$  МэВ по данным КА ACE, некоторых основных параметров МС, измеренных на КА ACE: скорости  $V$ , температуры  $T$  и плотности  $N$  солнечного ветра, компонент  $B_{x,y,z}$  ММП, а также величины  $D_{st}$  — вариации геомагнитного поля. Последовательность и форма изменения параметров СВ и ММП позволяют представить следующую картину динамической структуры МС. Резкий скачок величин  $V$ ,  $T$ ,  $N$ ,  $B_z$  в 14:14 UT 14.XII.06 (SC1 на рис. 4) означает приход ударной волны, созданной ВВП от вспышки 13.XII. Приход ударной волны проявился и как значительный подъем локализованных в ней ускоренных во вспышке частиц СКЛ с центром в указанное время (рис. 1). Последующий интервал времени до  $\sim 22:30$  UT 14.XII. детекторы КА регистрировали сжатый СВ за фронтом ударной волны. В дальнейшем

резкое снижение плотности плазмы, ее температуры (рис. 4) и обогащение плазмы гелием, проявившееся в виде скачка отношения  $He/H$  (не показано) свидетельствуют о приходе ВВП от вспышки 13.XII. На Земле наблюдается магнитная буря с величиной  $D_{st}$  ( $-180$  нТл) в главной фазе. Флуктуации ММП уменьшаются,  $B_z$ -компонента резко поворачивает на юг с дальнейшим плавным подъемом к нулю. Практически одновременно на Солнце происходит новая вспышка в той же АО (SF на рис. 4), которая и дала возрастание СКЛ типа «меандр». На графике скорости СВ (на быстром спаде) есть четкий пик, примерно в 08 UT 15.XII; в это же время происходит скачок плотности и температуры СВ (рис. 4). Мы полагаем, что это соответствует заднему фронту ВВП от вспышки 13.XII (SC2 на рис. 4). С этого момента после затухающей волны в форме «меандра» продолжается монотонный более медленный спад потока СКЛ. Таким образом, пространственно-временные вариации потоков СКЛ в форме «меандра» наблюдались 14–15.XII.06 в условиях высокой скорости, низких температуры и плотности СВ и в сильном ММП во вспышечном выбросе плазмы

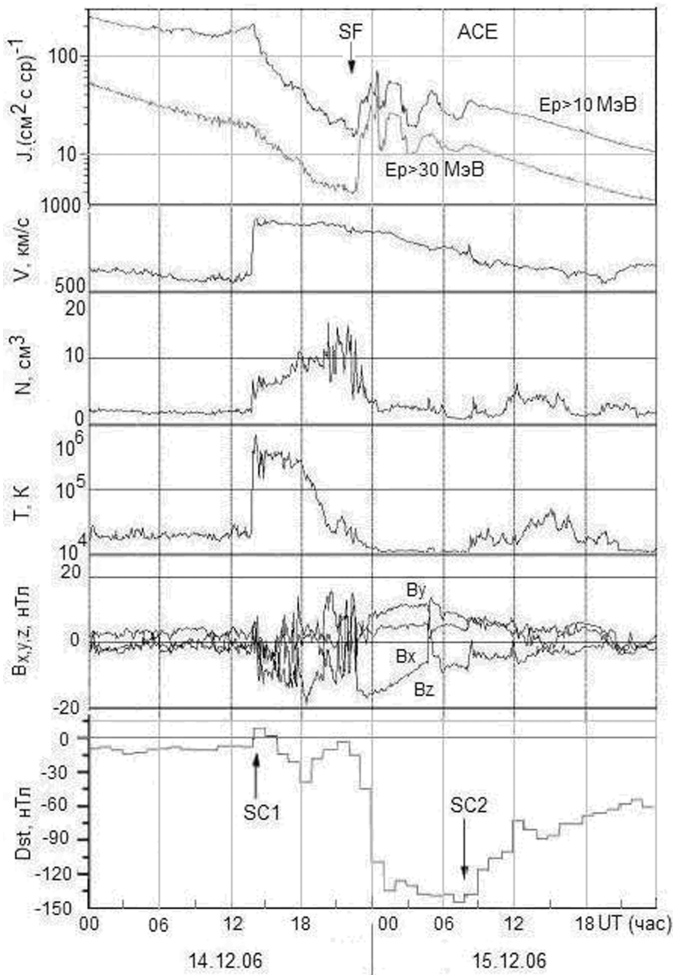


Рис. 4. Временные профили (сверху вниз): интенсивностей потоков протонов с  $E_p > 10$  МэВ и  $E_p > 30$  МэВ по данным КА ACE 14–15.XII.2006; параметров МС — скорости ( $V$ ), плотности ( $n$ ) и температуры ( $T$ ) СВ; компонент ММП ( $B_{x,y,z}$ );  $D_{st}$  — вариации магнитного поля Земли

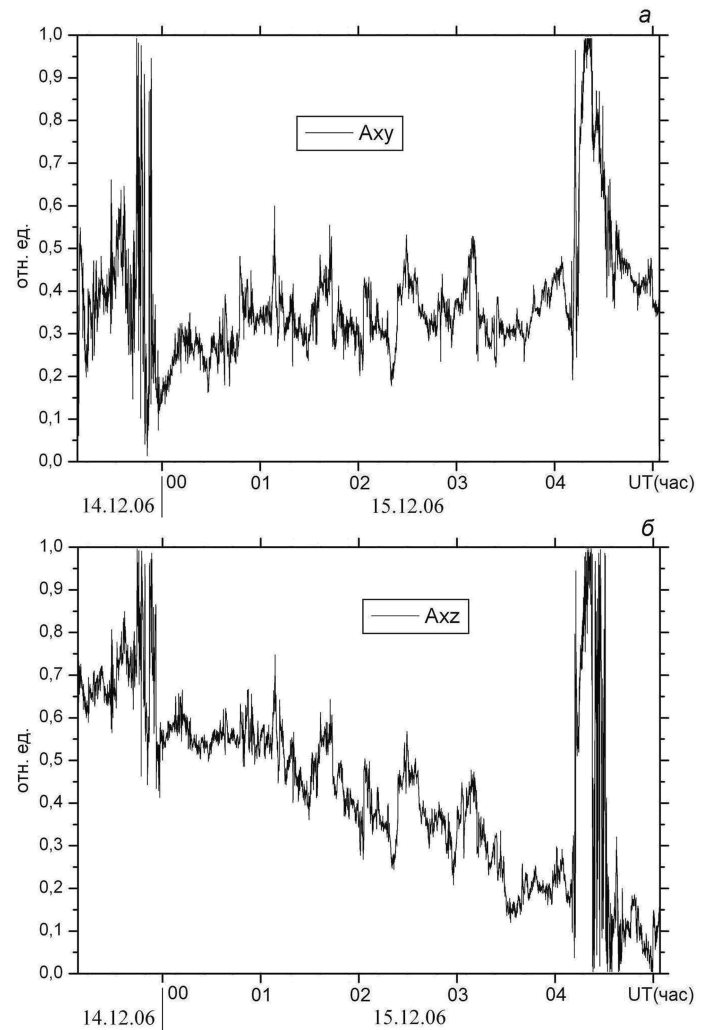


Рис. 5. По данным КА WIND: а — анизотропия  $A_{xy}$  компонент  $B_x$  и  $B_y$  (отношение их разности к сумме); б — то же для компонент  $B_x$  и  $B_z$  на начальном интервале «меандра» длительностью 6 ч

от вспышки 13.XII. Успеху наблюдений «меандра» в данном случае способствовал низкий уровень флуктуаций величины и ориентации вектора ММП.

Рассмотрим подробнее данные о ММП с КА WIND (рис. 5). На рис. 5, а показана анизотропия  $A_{xy}$  компонент  $B_x$  и  $B_y$  (отношение их разности к сумме) в плоскости эклиптики, а на рис. 5, б — то же для компонент  $B_x$  и  $B_z$  в меридиональной плоскости. (Компоненты поля представлены в системе координат GSE.) Присутствующий на рисунках высокочастотный «шум» с размером 5% разделен инверсными выбросами до  $\sim 20\%$ . Мы полагаем, что эти быстрые выбросы в ориентации магнитного поля соответствуют границам соприкасающихся трубок разных размеров. Можно предположить, что эти трубки находятся внутри большой трубки с границами на расстоянии  $\sim 4.5$  ч (время пересечения трубки регистрирующим детектором) на краях выбранного шестичасового интервала.

На этих границах выбросы анизотропии достигают 100%. В этом случае размеры скин-слоя будут составлять от 15 с для трубок с размером порядка часа и до 15 мин для большой трубки.

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

#### Данные о «меандре» с космических аппаратов STEREO-A, B

Данные приборов КА STEREO-A и STEREO-B помогают более полно изучить структуру потоков СКЛ типа «меандр» 14–15 декабря 2006 г.

Телескопы высоких энергий (HET) на этих КА имеют три дифференциальных интервала для электронов и 11 интервалов для протонов. Такой энергетический спектр, при временном разрешении 1 и 15 мин, 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 в СВ и ММП.

Рассмотрим эти данные подробнее. По данным ACE, WIND (рис. 1, а, б) и STEREO (рис. 1, в, г) есть различие амплитуды, формы, длительности вариаций «меандра». Однако главная особенность состоит в большом различии амплитуды «меандра» на STEREO-A и STEREO-B (рис. 1, г). На рис. 1, г изображены временные профили потоков протонов одинаковых энергий, зарегистрированные на КА STEREO-A и B. Если в максимумах вариаций «меандра» потоки были практически одинаковы, то в провалах — «щелях» — потоки суще-

ственно меньше на STEREO-A. Это различие зависит от энергии СКЛ и наблюдается как для протонов, так и для электронов. Заметим, что до и после «меандра» потоки совпадают. Отметим, что различие не может быть связано со структурными особенностями среды и присутствием КА в различных магнитоплазменных трубках, поскольку в это время КА находились еще очень близко друг к другу (около 7000 км) вблизи Земли. Это различие, скорее всего, объясняется различной ориентацией полей зрения приборов HET на разных КА. 14–15.XII.2006 поля зрения прибора HET на КА STEREO-A и STEREO-B ориентированы в плоскости эклиптики и взаимно перпендикулярны: прибор HET на КА STEREO-A смотрел вдоль традиционной спирали Паркера ( $\sim 45^\circ$  W относительно линии Земля–Солнце), а прибор HET на КА STEREO-B под углом  $\sim 45^\circ$  E [6]. Во время наблюдения «меандра» направление силовых линий ММП сильно отличалось от традиционного под влиянием выброса плазмы, в котором в это время находились все используемые нами для анализа КА. Силовые линии были ориентированы под углами  $\sim 30$ – $70$  и  $\sim 90^\circ$  относительно полей зрения приборов HET на КА STEREO-B и A соответственно. Отметим, что величина полного угла зрения приборов HET составляет 55 град. Таким образом, можно считать, что прибор HET на КА STEREO-B измерял поток протонов с небольшими питч-углами относительно поля, а на КА STEREO-A — с питч-углами  $\sim 90^\circ$ .

Подобная ситуация позволяет сделать оценки питч-углового распределения частиц в трубках. Из рис. 1, г легко получить, что в провалах — «щелях» асимметрия потоков (отношение разности к сумме) может достигать до 80%. Это имеет место за счет сильного уменьшения потока частиц с большими питч-углами, регистрируемыми на КА STEREO-A, т. е. поперек направления трубок, что, естественно, сдерживает свободный выход частиц из трубок. А в максимумах вариаций «меандра», соответствующих центральным областям трубок, где потоки частиц были практически одинаковы на КА STEREO-A и STEREO-B, угловое распределение протонов близко к изотропному, по крайней мере, из направления регистрации.

Можно отметить различие вариаций СКЛ в «меандре» 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. Солнечное направление варьирует мало, а северо-южное направление достигает почти 100% южной анизотропии. Этот эффект можно видеть уверенно на фоне шума лишь для ионов с энергией 3 МэВ (рис. 6).

Длительность регистрации вариации потока в южном направлении ( $\sim 4$  ч) соответствует времени регистрации большой трубки на КА WIND (рис. 5). Большую анизотропию, связанную с превышением потока частиц в трубке ММП в одном направлении над другим, мы наблюдали и на КА ГРАНАТ 19.03.1990.

Рассмотренный случай распространения частиц в чередующихся структурах магнитного поля — магнитных трубках в декабре 2006 г. можно представить как один из частных вариантов «отражательной» модели [10, 18] в возмущенной межпланетной среде.

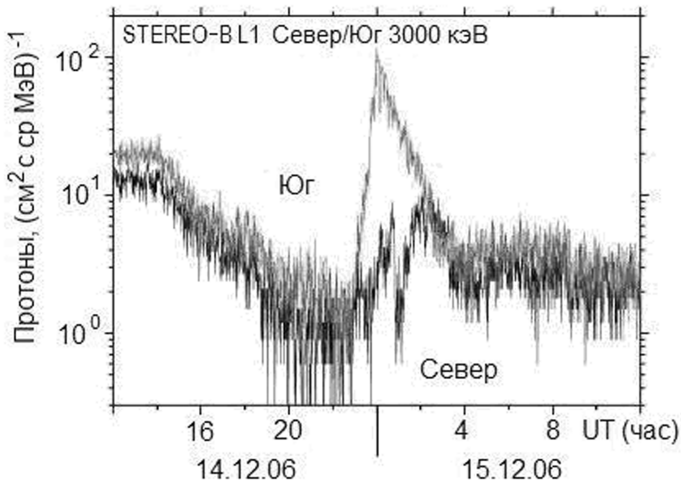


Рис. 6. Временные профили потоков протонов с  $E = 3$  МэВ, измеренные в направлении на север (черная кривая) и на юг (серая), по данным КА STEREO-B 14–15.XII.2006

Для анализа мы выбрали лишь отдельные, наиболее яркие примеры.

Обратим внимание на методические особенности, которые необходимо учитывать при анализе динамики и структуры типа «меандр». Могут различаться потоки СКЛ в разных трубках ММП при их заселении вспышкой, размеры трубок (их диаметр), размеры и формы арок и петель трубок, расстояния от места вспышки (по долготе, широте и высоте), интегральная прозрачность трубок, энергетические спектры СКЛ и дисперсия по скоростям. Может играть роль скорость плазмы (в трубке и обтекающей ее), ориентация трубок в среде по всем трем координатам.

### Заключение

Сравнение двух случаев наблюдения «меандра» в разные годы и различной аппаратурой позволяет более полно изучить этот феномен и формулировать его свойства и условия для его наблюдения. Необходимость дальнейшего изучения структуры и свойств этого феномена позволит более определенно устанавливать солнечно-земные и солнечно-гелиосферные связи. Такие связи на больших расстояниях от Солнца можно уверенно находить, лишь «окрашивая» объекты сходными признаками. Сделанный нами анализ показал, что размеры дискретных структур «меандра» совпадают. Экспериментальные данные, полученные на КА ACE, WIND и особенно на STEREO, позволяют видеть более тонкую структуру «меандра» в более широких спектральных интервалах и определять трехмерное угловое распределение (анизотропию) потока СКЛ.

Предложено описание вариаций потока СКЛ солнечной вспышки на основе эмпирической «отражательной» модели движения, накопления и модуляции космических лучей [10].

Найден структурный источник этих вариаций на Солнце в виде дискретных магнитных плазменных петель и арок между активными областями. Пересечение области расположения детектора данной структурой в форме магнитоплазменных трубок, перенесенной из

хромосферы и короны, удачно развернутой в межпланетной среде за счет динамических процессов в СВ и несущей поток СКЛ и является причиной наблюдения пространственно-временных вариаций СКЛ типа «меандр» и «щель».

Эти вариации могут быть зарегистрированы на 1 а. е. при условиях, что долгота вспышки должна быть западной и до точки соединения детектора с Солнцем, временное разрешение регистрации СКЛ желательно иметь порядка одной минуты на фазе роста интенсивности, а состояние межпланетной среды, в которой распространяются СКЛ, обеспечивает спокойный перенос магнитоплазменных трубок.

Авторы благодарны за организацию эксперимента на ИСЗ ГРАНАТ, его осуществление, обработку научной информации нашим коллегам Н. Н. Контору, [Е. А. Чучкову], С. А. Филиппычеву, Н. Н. Павлову, С. И. Ермакову. Выражаем признательность А. Б. Струминскому за полезную информацию о зарубежных исследованиях событий в декабре 2006 г. по данным STEREO и WIND и за ознакомление с новой информацией высокого пространственного, временного и энергетического разрешения.

Авторы благодарны участникам проектов ACE, WIND, STEREO, SEC/NOAA, WDC-C2 Kyoto за возможность интернет-доступа к их данным.

### Список литературы

1. Вернов С.Н., Тверской Б.А., Любимов Г.П. и др. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1975. **39**, № 2. С. 340.
2. Любимов Г.П. // Изв. РАН. Сер. физ. 2003. **67**, № 3. С. 353.
3. Чучков Е.А., Ермаков С.И., Кадобнов В.Б. и др. // Письма в Астрон. журн. 1991. **17**, № 2. С. 135.
4. Ермаков С.И., Контор Н.Н., Любимов Г.П. и др. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1991. **55**, № 10. С. 1889.
5. Ермаков С.И., Любимов Г.П., Тулунов В.И., Чучков Е.А. // Космич. исслед. 2007. **45**, № 2. С. 108.
6. Rosenvinge T.T., Richardson I.G., Reames D.V. et al. // Solar Phys. 2009. **256**. P. 443.
7. Mulligan T., Blake J.B., Shaul D. et al. // SHINE Workshop. June 26–27, 2008.
8. Lario D. // SHINE Workshop. June 26–27, 2008.
9. Любимов Г.П., Власова Н.А., Тулунов В.И. и др. // Космич. исслед. 2011. **49**, № 6. С. 491.
10. Любимов Г.П. // Астрон. циркуляр АН СССР. 1988. № 1531. С. 1916.
11. Арцимович Л.А. Элементарная физика плазмы. М., 1963.
12. Альвен Г., Фельтхаммар К.-Г. Космическая электродинамика. М., 1967.
13. McCracken K.G., Ness N.F. // J. Geophys. Res. 1966. **71**, № 13. P. 3315.
14. Любимов Г.П., Контор Н.Н., Переслегина Н.В., Игнатьев П.П. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1976. **40**, № 3. С. 462.
15. Любимов Г.П., Переслегина Н.В. // Астрон. журн. 1985. **62**, № 4. С. 780.
16. Zombeck M.V., Yaiana G.S., Haggerty R. et al. // Astrophysical J. Suppl. Ser. 1978. **38**. P.69.
17. Любимов Г.П. // Астрон. циркуляр АН СССР. 1985. № 1362. С. 4.
18. Любимов Г.П., Григоренко Е.Е. // Космич. исслед. 2007. **45**, № 1. С. 12.

**“Meander”-like and “slit”-like variations in the flux of solar cosmic rays****G. P. Lyubimov, V. I. Tulupov<sup>a</sup>, N. A. Vlasova***D. V. Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.**E-mail: <sup>a</sup> ikt0840@mail.ru.*

Results of studying the origin of “meander”-like and “slit”-like variations in fluxes of solar cosmic rays (SCR) are presented as exemplified by the events that occurred on March 19, 1990 and December 14–15, 2006. Experimental data that were obtained by the GRANAT, ACE, Wind, STEREO-A, and STEREO-B spacecrafts are used. The analysis is based on the data of observations of dynamic structures in the solar atmosphere and their continuation in the heliosphere, as well as on an empirical “reflection” model of the movement, accumulation, and modulation of cosmic rays. A structural source of these variations on the Sun is discussed, which is shaped as discrete magnetic plasma loops and arches located between active regions. Such structures in the form of magnetic-plasma tubes transferred from the chromosphere and corona and filled with SCR rotate together with the Sun and, when crossing the detector location region, cause space–time variations in meander-like and slit-like variations in SCR.

*Keywords:* solar flares, solar cosmic rays, interplanetary magnetic field.*PACS:* 96.50.Vg; 96.50.Bh.*Received 17 April 2014.*English version: *Moscow University Physics Bulletin* 5(2014).**Сведения об авторах**

1. Любимов Герман Павлович — доктор. физ.-мат. наук, профессор, гл. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-56-06, e-mail: gpl1924@mail.ru.
2. Тулупов Владимир Иванович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник, вед. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-51-01, e-mail: ikt0840@mail.ru.
3. Власова Наталия Андреевна — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-56-06, e-mail: nav19iv@gmail.com.