



ДИАГНОСТИКА СТРУКТУРЫ МЕЖПЛАНЕТНОЙ СРЕДЫ ПО ДИНАМИКЕ ПОТОКОВ СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОНОВ 20.II.2014

Памяти Германа Павловича Любимова

Н.А. Власова, В.И.Тулупов, В.В.Калегаев

*Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына
Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова,
г. Москва, Россия*

nav19iv@gmail.com

Посвящается памяти Германа Павловича Любимова



Герман Павлович Любимов (02.07.1924) - главный научный сотрудник НИИЯФ МГУ, доктор физ.-мат. наук, профессор, крупный специалист в области физики Солнца и межпланетной среды.

Стаж работы в МГУ – с 1942 года, в НИИЯФ МГУ – с 1960 г. Ветеран Великой Отечественной Войны.

Г.П.Любимов - один из пионеров космических экспериментов, возглавлявший творческий коллектив лаборатории физики гелиосферы НИИЯФ МГУ, силами которого проведены исследования на автоматических межпланетных станциях серий Зонд, Марс, Венера, Луна, Луноход, Вега, Фобос и ИСЗ ГРАНАТ (в 1961-1996 гг. - 44 эксперимента).

Введение 1

Солнечные энергичные частицы служат инструментом для диагностики их источников на Солнце, структуры и состояния межпланетного магнитного поля, солнечного ветра и магнитосферы Земли [Любимов, 2003]. В работах [Любимов, 1986; 2006] предложена физическая и расчетная модель восходящего ускоряющегося потока солнечного ветра между дискретными арочными структурами хромосферы и короны Солнца. Модель позволяет вытягивание арочных структур на Солнце и вынос их в гелиосферу с образованием петель в межпланетной среде. В соответствии с моделью гелиосферные квазистационарные системы петель ММП заполняются при вспышках СЭЧ наподобие радиационных поясов Земли [Любимов, 2002]. В работах Г.П. Любимова (см., например, [Любимов, 2003]) показано, что СЭЧ движутся вдоль силовых линий ММП, которое коллимирует поток частиц. В работе [Любимов, 1988] предложена эмпирическая «отражательная модель» движения, накопления и модуляции частиц, созданная на основе фундаментальных физических принципов с использованием большого количества наблюдательных данных о потоках СЭЧ, о солнечном ветре и ММП. Одним из основных принципов является наличие причинно-следственной связи между источником и его откликом, где бы они не находились: на Солнце, в гелиосфере, в околоземном пространстве.

Введение 2

В «отражательную модель» заложено существование коронального распространения СЭЧ, то есть частицы из области солнечной вспышки могут распространяться в короне на значительные расстояния по связанным арочным системам, что дает возможность регистрации СЭЧ и от залимбовых вспышек. «Отражательная модель» предполагает захват и перенос частиц в полупрозрачных магнитных ловушках, образованных силовыми линиями ММП, вытянутыми от Солнца [Любимов и Григоренко, 2007]. По экспериментальным данным с автоматических межпланетных станций (АМС) «Марс-4,5,7» обнаружены петли магнитоплазменных трубок [Любимов и др., 1976]. Петли были вытянуты солнечным ветром из активных областей Солнца, в одной из которых произошла солнечная вспышка, заселившая их солнечными частицами. В работе [Любимов и Переслегина, 1985] показано существование в СВ и в ММП квазистационарных образований, состоящих из дискретных дублетных и мультиплетных структур. На основе анализа анизотропии СКЛ на трёх АМС «Марс-4,5,7» обнаружены дискретные петли ММП размером до 6 а.е. с размерами магнитных трубок $\sim 10^6$ км [Любимов и др., 1976]. Исследование вспышки 19.III.1990 по экспериментальным данным с ИСЗ «Гранат» позволили обнаружить на 1 а.е. пучки трубок с характерным размером $(0.5 \div 2) \cdot 10^6$ км и с минимальным - $0.03 \cdot 10^6$ км [Ермаков и др., 1991].

Аннотация

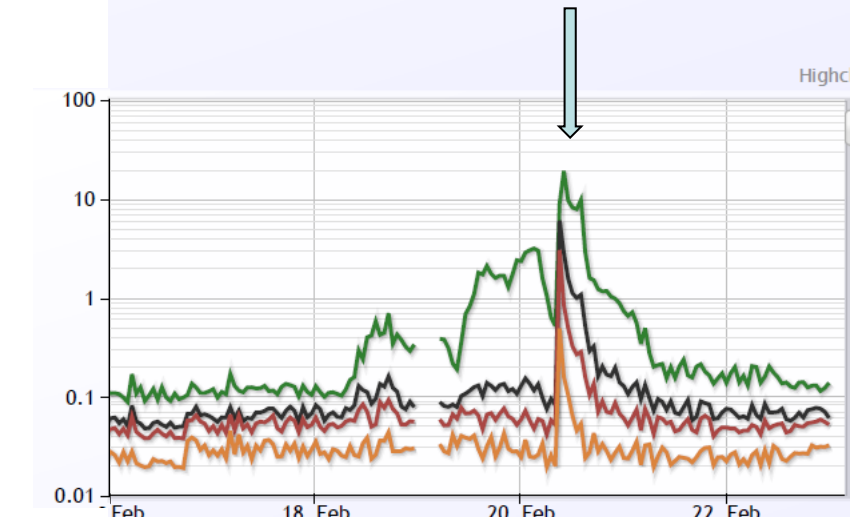
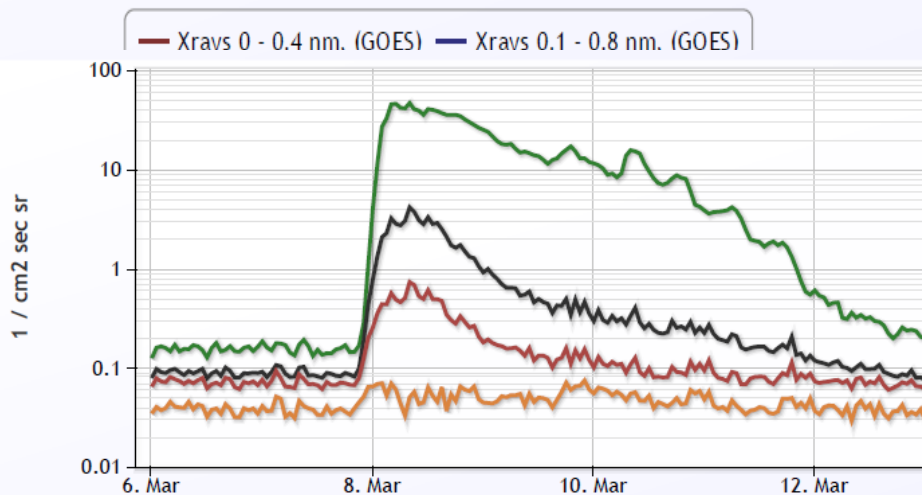
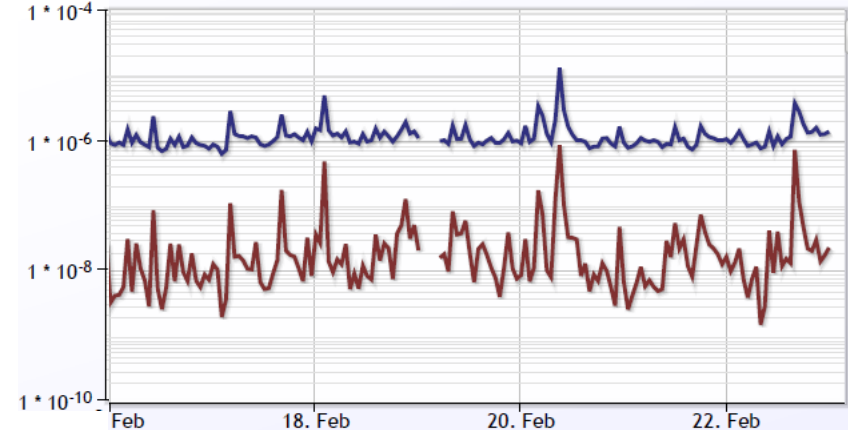
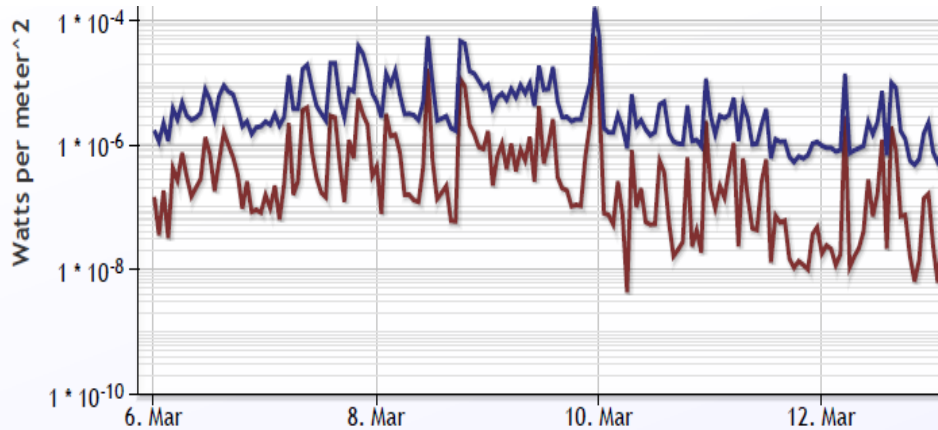
Представлены результаты исследования двух солнечных протонных событий 07.III.2011 и 20.II.2014, которые ассоциируются с солнечными вспышками, имеющими практически одинаковую мощность и расположенными на близких гелиодолготах, на западной стороне солнечного диска: 07.03.2011 балл M3.7/SF и координаты N31W67; 20.02.2014 балл M3.0/SN и координаты S15W73. Работа сделана на основе экспериментальных данных, полученных с КА ACE и IC3 GOES, расположенных в межпланетном пространстве в точке L1 и внутри магнитосферы Земли на геостационарной орбите, соответственно. Проведен сравнительный анализ особенностей временных профилей потоков солнечных энергичных протонов и вариаций параметров межпланетной среды: скорости и плотности солнечного ветра и величины и направления межпланетного магнитного поля.

Целью представленной работы является попытка интерпретации некоторых особенностей наблюдаемых временных профилей потоков солнечных протонов частичной модуляцией при распространении частиц в межпланетной среде.

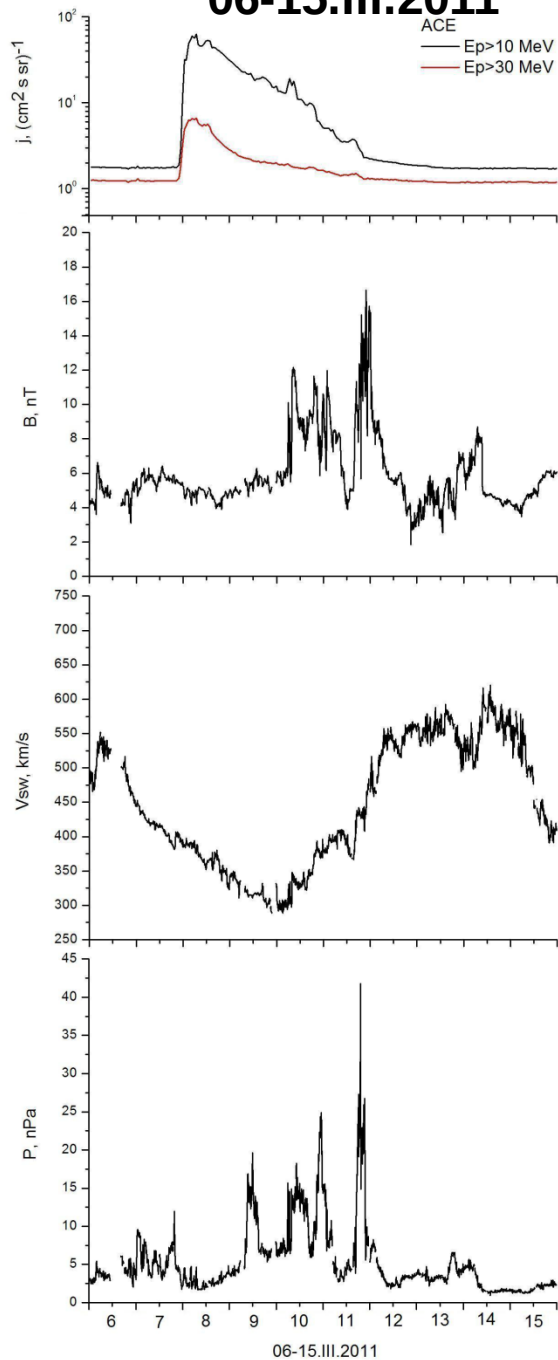
-----PARTICLE EVENT----- ASSOCIATED -----FLARE AND ACTIVE REGION-----

Start (Day/UT)	Maximum (pfu @ >10 MeV)	Proton Flux (pfu @ >10 MeV)	CME (Loc./ Day UT)	Flare Max. Importance (Loc./ Day UT)	Flare Max. Importance (Xray/Opt.)	Location Region# (SWO)
-------------------	----------------------------	--------------------------------	-----------------------	---	--------------------------------------	---------------------------

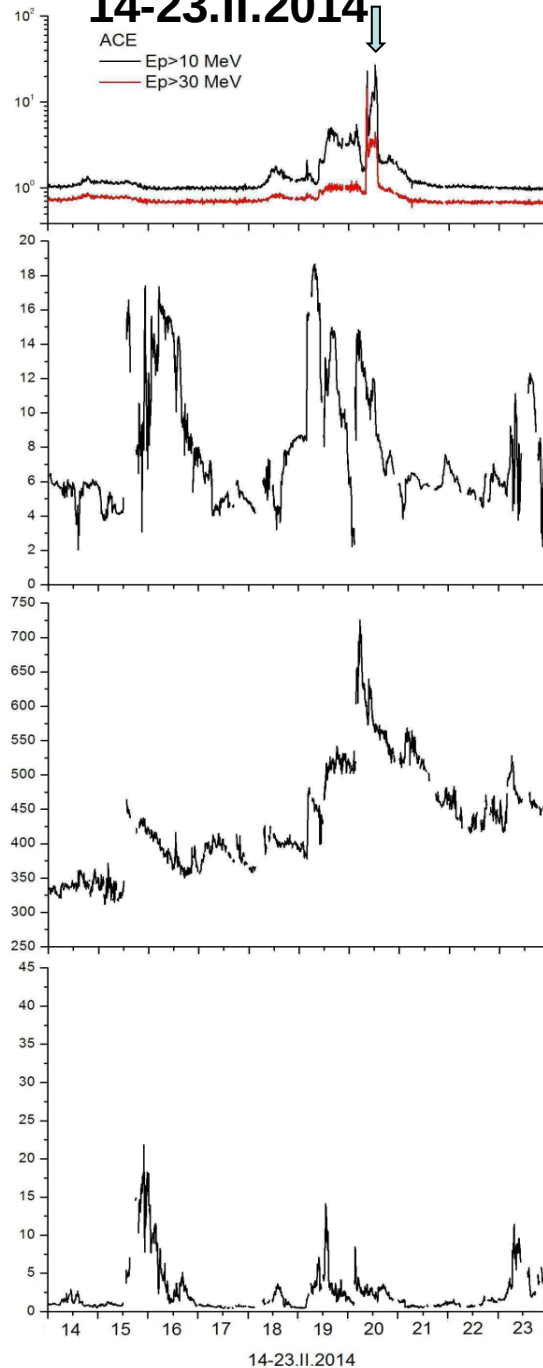
1 Mar 08/0105	Mar 08/0800	50	SW/07 2000	Mar 07/2012	M3.7/Sf	N31W53 11640
2 Feb 20/0850	Feb 20/0925	22	SW/20 0800	Feb 20/0756	M3.0/SN	S15W73 11976



06-15.III.2011



14-23.II.2014



Временные профили

потоков солнечных протонов

$E > 10 \text{ МэВ}$

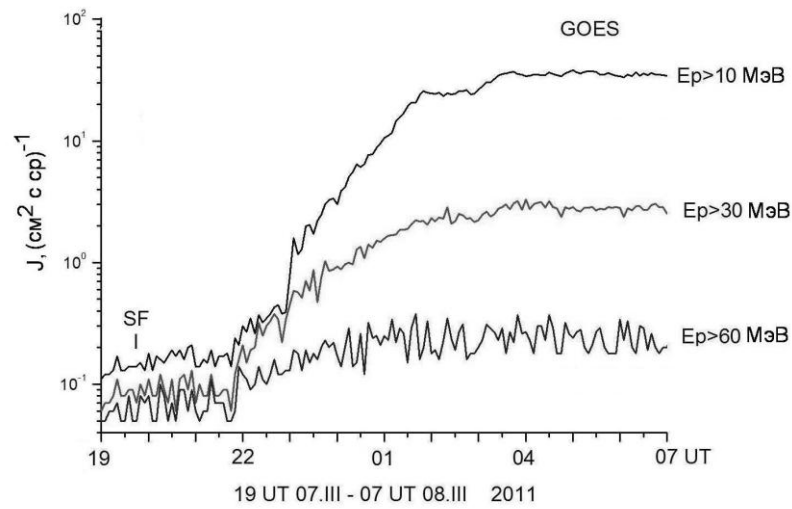
$E > 30 \text{ МэВ}$

**величины межпланетного
магнитного поля (В);**

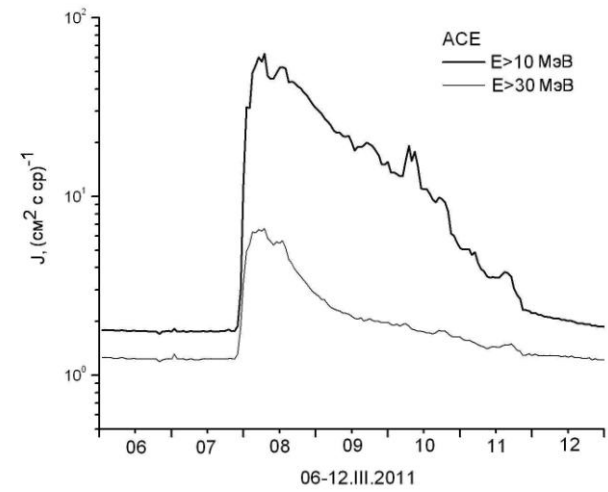
**скорости солнечного ветра
(V);**

**давления солнечного ветра
(P)**

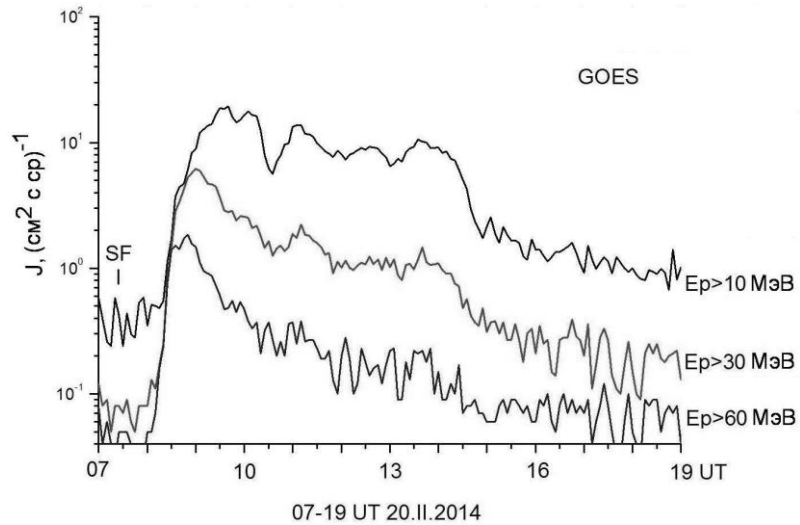
**по данным космического
аппарата ACE в
межпланетном пространстве
(точка Лагранжа L1)**



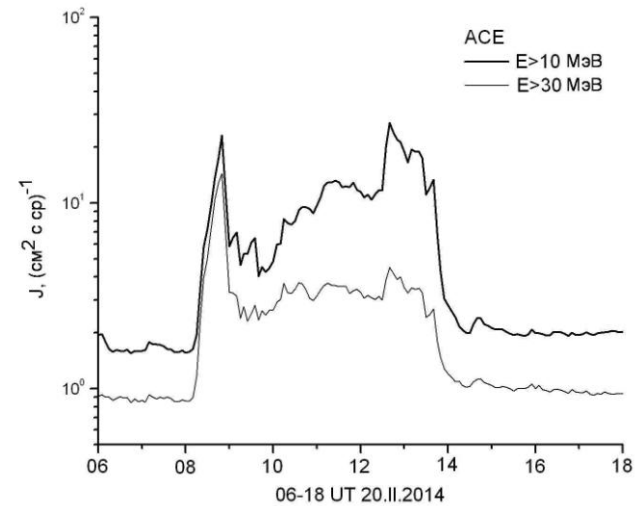
а



б



в



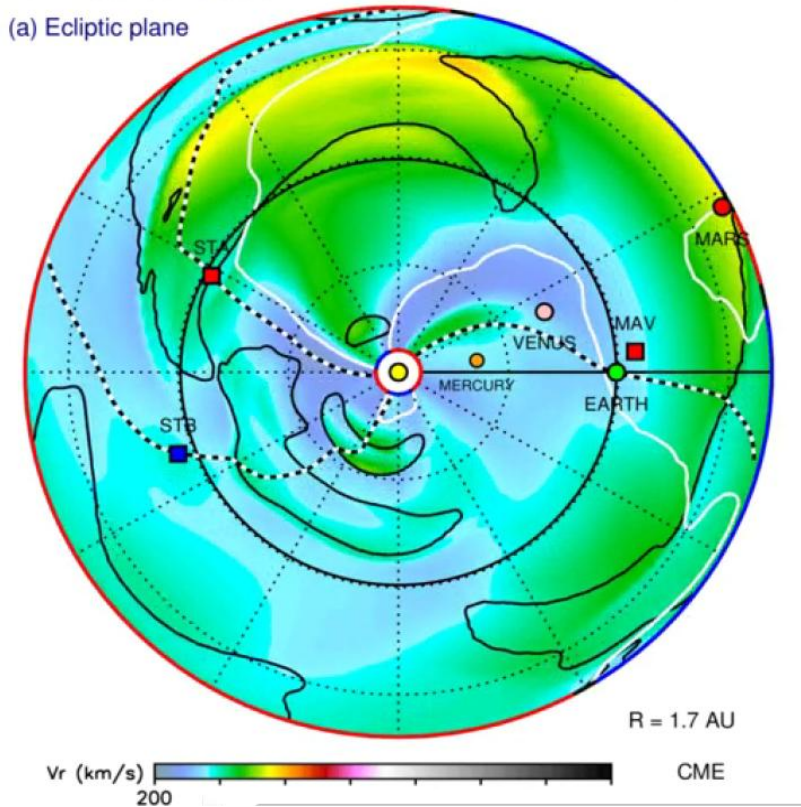
г

Временные профили потоков солнечных протонов:
по данным ИСЗ GOES в течение 12 часов от начала вспышек
19 UT 07.III ÷ 07 UT 08.III.2011 (а) и 07 ÷ 19 UT 20.II.2014 (б);
по данным КА ACE 07 ÷ 12.III.2011 (в) и 06 ÷ 18 UT 20.II.2014 (г).

Предполагаемый сценарий в феврале 2014 г.

18.II.2014 часть силовых линий магнитного поля Солнца от слабой вспышки в АО11976 захватывается высокоскоростным потоком СВ от KBM типа гало (табл.). Поток СВ вместе с силовыми линиями магнитного поля достигает околоземного космического пространства 20.II.2014. В ~03 UT 20.II.2014 приборы КА ACE регистрируют приход ударной волны от данного KBM, что проявляется как резкое увеличение скорости СВ и усиление ММП, а также как скачки плотности и температуры СВ. В дальнейшем скачек плотности, начало снижения температуры СВ, увеличение флуктуаций ММП в ~07:30 UT свидетельствуют о приходе KBM. Практически одновременно, в 07:26 UT, в АО11976 происходит вспышка, которая и дала исследуемое возрастание потока солнечных протонов. Поток солнечных протонов от вспышки 20.II.2014 распространяется в межпланетном пространстве по вытянутому высокоскоростным потоком СВ силовым линиям ММП. Длина силовой линии ММП, по которой солнечные протоны распространяются в межпланетной среде до Земли, 20.II.2014 существенно короче, чем 07.III.2011 как вследствие более высокой скорости СВ 20.II.2014, так и из-за значительного отклонения гелиошироты вспышки 07.III.2011 (N31) от гелиошироты (~S7) эклиптической точки регистрации – положения Земли. В связи с этим и более крутой фронт нарастания потока протонов 20.II.2014.

(a) Ecliptic plane



Предполагаемый сценарий

CME 2014.02.18 01:36 UT S24E34

Halo V~700 km/s Солнце – Земля

2014.02.20 ~03÷05 UT

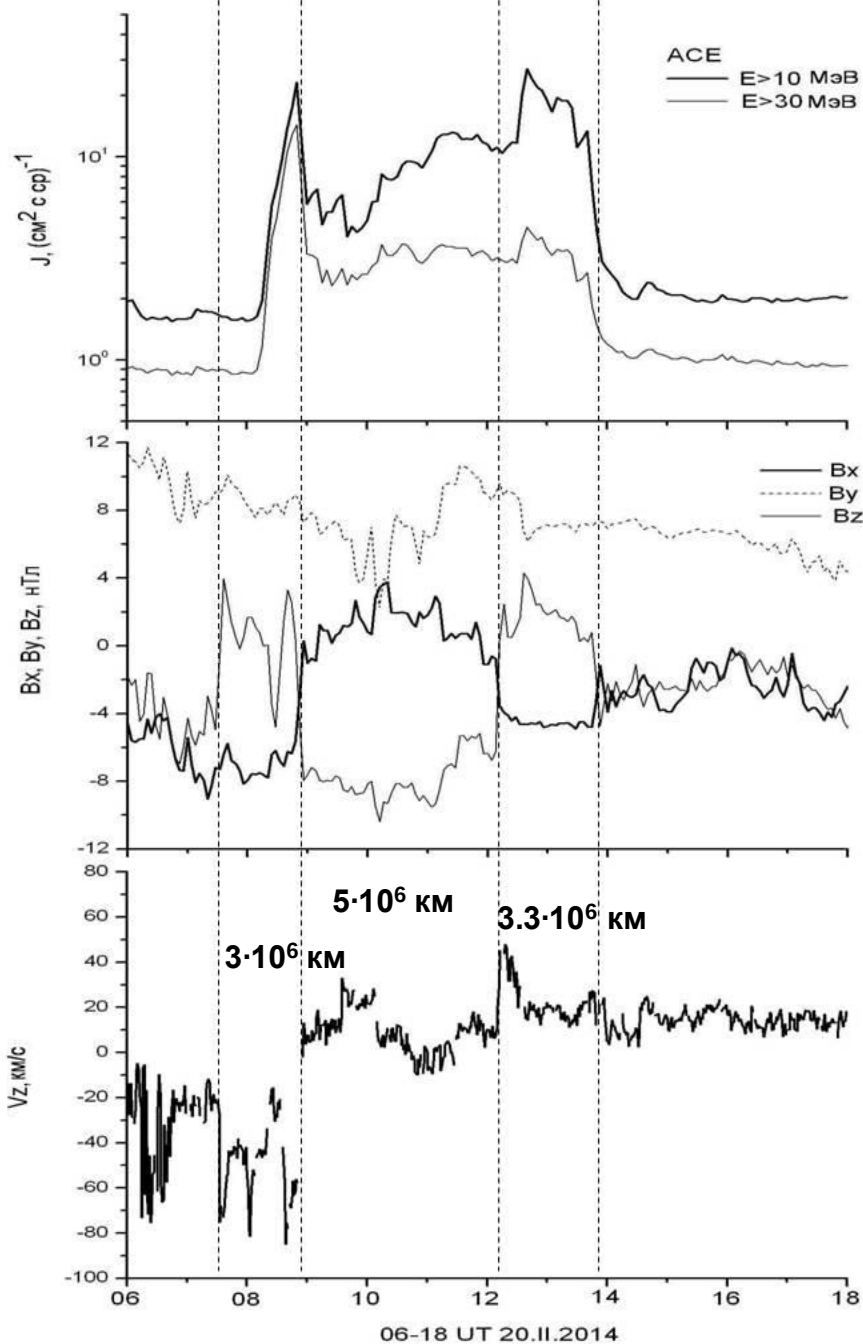
SF 2014.02.18 01:42 UT S16W42 AR 11976

$\Delta t=2,25$ суток $\Delta W\sim 30^\circ$ W42 — W73

SF 2014.02.20 07:56 UT S15W73 AR11976

<http://helioweather.net/archive/2014/02/>

Солнечная вспышка				Корональные выбросы массы					АО
Дата	UT	координаты	балл	дата	UT	Линейная скорость, км/сек	угол	координаты	
2011.III.07	19:43	N31W53	M3.7/SF	2011.III.07	20:00	2125	гало	N31W53	11640
2014.II.18	01:27	S16W42	C4.7						11976
				2014.II.18	01:36	779	гало	S24E34	
2014.II.20	07:26	S15W73	M3.0/SN	2014.II.20	08:00	948	гало	S15W73	11976



20.II.2014 солнечные протоны достигли Земли внутри сложной межпланетной структуры – внутри KBM. Наиболее яркие особенности временного профиля потоков солнечных протонов коррелируют по времени с вариациями скорости СВ и, главным образом, с вариациями B_x и B_z компонент ММП. Можно предположить, что резкие изменения величин B_x и B_z компонент ММП являются границами магнитоплазменных трубок, ориентированных различным образом (границы трубок показаны тонкими пунктирными вертикальными линиями). Расчет на основе реальной скорости межпланетной структуры (скорости распространения KBM) 20.II.2014 показал, что размер трубок составляет $\sim 3 \cdot 10^6$, $\sim 5 \cdot 10^6$ и $\sim 3.3 \cdot 10^6$ км. Ларморовский радиус движения протонов с энергией $\sim 10 \div 30$ МэВ в магнитном поле с напряженностью $\sim 5 \div 10$ нТл составляет $\sim (1 \div 5) \cdot 10^3$ км.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 1

Проведен сравнительный анализ двух солнечных протонных событий 07.III.2011 и 20.II.2014, которые ассоциируются с солнечными вспышками, близкими по мощности и расположенными на близких долготах на западной стороне солнечного диска.

Показано, что основные различия временных профилей потоков солнечных протонов 07.III.2011 и 20.II.2014 связаны с влиянием межпланетной среды на динамику потоков частиц. Результаты сравнительного анализа временных вариаций потоков солнечных протонов с $E > 10$ МэВ и $E > 30$ МэВ и B_x и B_z компонент межпланетного магнитного поля 20.II.2014 свидетельствуют об определяющей роли структуры межпланетного магнитного поля на формирование особенностей временных профилей потоков частиц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 2

Полученные экспериментальные результаты подтверждают ранее высказанные предположения о том, что фундаментальной структурой в гелиосфере является магнитоплазменная трубка [1] и что распространение солнечных космических лучей в межпланетной среде преимущественно происходит в квазистационарных структурах межпланетного магнитного поля [2], а в процессе распространения солнечные протоны могут частично захватываться новыми структурами межпланетного магнитного поля [3].

Литература

1. **Любимов Г. П.**, *Контор Н. Н., Переслегина Н. В., Игнатьев П. П.* Анизотропия солнечных протонов и неоднородности межпланетной среды // Известия АН СССР, серия физическая, 1976, т. 40, № 3, 462-470 (9).
2. **Любимов Г.П.** Отражательная модель движения СКЛ в петлевых ловушках // *Астрономический циркуляр АН СССР*. 1988. № 1531. С. 1916.
3. Тулупов В.И., Григоренко Е.Е., Власова Н.А., **Любимов Г.П.** Движение и перенос солнечных космических лучей в гелиосферных ловушках на примере события 28-31.I.2001 // *Космические исследования*. 2012. Т.50. №6. С. 427-434

Выборка из списка публикаций Г.П. Любимова

Любимов Г.П. Вытягивание магнитных петель в атмосфере Солнца // Астрономический циркуляр АН СССР. 1986. № 1441. С. 5-6.

Любимов Г.П. Отражательная модель движения СКП в петлевых ловушках // Астрономический циркуляр АН СССР. 1988. № 1531. С. 19-20.

Любимов Г.П. Локальные радиационные пояса Солнца // Космические исследования. 2002. Т. 40. № 6. С. 610-615.

Любимов Г.П. Диагностическая методика исследования межпланетного магнитного поля, плазмы солнечного ветра и их источников на Солнце // Известия АН СССР. Сер. физ. 2003. Т. 67. № 3. С. 353-366.

Любимов Г.П. Восходящие потоки в атмосфере Солнца и формирование солнечного ветра // Космические исследования. 2006. Т. 44. № 2. С. 118-135.

Любимов Г.П., Григоренко Е.Е. Об отражательной модели солнечных космических лучей // Космические исследования. 2007. Т. 45. № 1. С. 12-19.

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. 780-789.

Любимов Г.П., Контор Н.Н., Переслегина Н.В., Игнатьев П.П. Анизотропия солнечных протонов и неоднородности межпланетной среды // Известия АН СССР. Сер. физ. 1976. Т. 40. № 3. С. 462-470.

Любимов Г.П., Щербовский Б.Я. Определение характерных структур межпланетного магнитного поля солнечного ветра 8 сентября 1973 г. по данным АМС «Марс-7» // Космические исследования. 2003. Т. 41. № 5. С. 549-552.

Ермаков С.И., Контор Н.Н., Любимов Г.П., Тулупов В.И., Чучков Е.А. Вспышка солнечных космических лучей в марте 1990 г. // Известия АН СССР. Сер. физ. 1991. Т. 55. № 10. С. 1889-1893.

Тулупов В.И., Григоренко Е.Е., Власова Н.А., Любимов Г.П. Движение и перенос солнечных космических лучей в гелиосферных ловушках на примере события 28-31.I.2001 // Космические исследования. 2012. Т.50. №6. С. 427-434.