

УДК 523.62-726

СОЛНЕЧНЫЕ ИСТОЧНИКИ МЕЖПЛАНЕТНЫХ УДАРНЫХ ВОЛН 7–11 НОЯБРЯ 2004 г.

© 2011 г. К. Г. Иванов

Учреждение РАН Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова, г. Троицк (Московская обл.)
e-mail: kivanov@izmiran.troitsk.ru

Поступила в редакцию 14.05.2010 г.

Методически независимо от более ранних работ осуществляется привязка к солнечным источникам серии из 6-ти межпланетных ударных волн, наблюдавшихся 7–11 ноября 2004 г. во время очень большой солнечно-земной бури. Результаты различных авторов сопоставляются друг с другом и с данной публикацией.

1. ВВЕДЕНИЕ

Одной из самых замечательных солнечно-земных бурь 23-го цикла была буря начала ноября 2004 г. Первые предварительные итоги наблюдений и интерпретаций явлений этой бури от Солнца до Земли были опубликованы большим количеством авторов в обширной статье Ермолаева и др. [2005]. Затем появились результаты более углубленных исследований отдельных проявлений этой бури: корональных выбросов массы (СМЕ), транзиентных корональных дыр (диммингов) и трансэкваториальной активности [Черток, 2006; Wang et al., 2007], связи вспышек и волокон с СМЕ, межпланетными возмущениями и их моделирование [Williams et al., 2005; Narra et al., 2007; Pohjolainen et al., 2007; Dasso et al., 2007; Longcope et al., Bisi et al., 2008]. В работах Иванова [2010, 2010a] в рамках более широкого подхода рассматривается возникновение этой бури и ее место в квазидвухлетней вариации солнечной активности в мае 2004 – декабре 2005 г.

Исследование этой бури с этой последней точки зрения потребовало уточнение одного частного результата, а именно привязки межпланетных ударных волн к их солнечным источникам. Дело в том, что этому вопросу уделено значительное внимание в работах Ермолаева и др. [2005] и Narra et al. [2007]. Между тем результаты этих работ не согласуются друг с другом и даже в пределах одной и той же работы [Ермолаев, 2005] привязка волн к солнечным источникам радикально иная в табл. 4 по сравнению с табл. 1.

Цель данной статьи – провести методически независимую привязку межпланетных ударных волн к их солнечным источникам.

Данные и методика, результаты, обсуждение и выводы проводятся ниже в разделах 2–5.

2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА

7–11 ноября в околоземном межпланетном пространстве наблюдалась серия из 6-ти ударных волн, солнечные источники которых были связаны со вспышечно-продуктивной областью АО 10696 и явлениями ее трансэкваториального взаимодействия с южной корональной дырой и ассоциированной с ней областью АО 10696 [Ермолаев и др., 2005; Narra et al., 2007; Wang et al., 2007].

С 3 по 10 ноября в АО 10696 наблюдалось 39 субвспышек и 8 вспышек (четыре – балла 1n, две – балла 2n и по одной балла 1b и 3b) (ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR-DATA/SOLAR_FLARES). В этот же интервал времени зарегистрировано 32 СМЕ, из них 7 полных и 3 частичных СМЕ типа гало (halo) (http://Cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/).

С 3 по 8 наблюдалось также 7 четких явлений трансэкваториальной активности (возникновение, уярчение и эрупция корональных петель и волокон), которые были увязаны с восьмью вспышками в рентгеновском диапазоне [Wang et al., 2007].

При привязке использована традиционная методика [Иванов, 1995], основанная на радиусах геоэффективности вспышек в Ha с баллами $\geq 1n$ и учете направления распространения ударного фронта, но модифицированная включением информации о корональных выбросах типа гало. Рентгеновские вспышки, с нашей точки зрения, могут быть менее надежными индикаторами солнечных источников геоэффективных СМЕ в силу недавно обнаруженного редкого, но все же встречающегося, отсутствия выхода каких-либо СМЕ даже после очень мощных рентгеновских вспышек [Gopalswamy et al., 2008; Иванов, 2010].

Таблица 1. Солнечные источники (вспышки – *sfe*, корональные выбросы – *CME*) межпланетных ударных волн (МУВ) 7–11 ноября 2004 г.

Параметры <i>sfe</i> и <i>CME</i>	МУВ1 7.11.2004 г. 02:00				МУВ2 7.11.2004 г. 10:00			
	<i>sfe</i>							
	<i>E1</i>	<i>E4</i>	<i>H</i>	<i>I</i>	<i>E1</i>	<i>E4</i>	<i>H</i>	<i>I</i>
Дата	4.11	3.11	4.11	4.11	4.11	4.11	–	5.11
UT	08:45	15:24	–	21:47	21:42 22:34	09:00	–	11:27
Ф, град.	N08	N04	–	N10	N11	N03	–	N07
Λ, град.	E28	E37	–	E20	E19	E27	–	E12
Балл	<i>sn/C6.3</i>	<i>sn/M4.7</i>	<i>M5.5</i>	<i>1n</i>	<i>1n/M2.5</i> <i>1n/M5.4</i>	<i>sf/C6.0</i>	–	<i>1b</i>
	<i>CME</i>							
Тип	P. halo	–	–	P. halo	P. halo P. halo	–	–	–
Дата	4.11	3.11	4.11	4.11	04.11	04.11	–	05.11
UT	–	15:54	23:30	23:30	–	09:54	–	12:06
Параметры <i>sfe</i> и <i>CME</i>	МУВ3 7.11.2004 г. 17:35				МУВ4 9.11.2004 г. 09:45			
	<i>sfe</i>							
	<i>E1</i>	<i>E4</i>	<i>H</i>	<i>I</i>	<i>E1</i>	<i>E4</i>	<i>H</i>	<i>I</i>
Дата	6.11.	4.11.	6.11.	6.11.	–	6.11.	7.11.	7.11.
UT	00:11 00:44 01:40	21:42	–	00:13	–	00:00	–	15:42
Ф, град.	N10	N05	–	N10	–	N04	–	N09
Λ, град.	E08	E18	–	E08	–	E04	–	W17
Балл	<i>2n/M9.3</i> <i>M5.9</i> <i>M3.6</i>	<i>1n/M5.8</i>	<i>M9.3</i> <i>M5.9</i> <i>M3.6</i>	<i>2n</i>	–	<i>2n/M9.3</i>	<i>X2</i>	<i>X2/TF</i>
	<i>CME</i>							
Тип	halo halo halo	halo	–	halo P. halo	–	halo	–	halo
Дата	06.11	05.11	–	6.11	–	6.11	7.11	7.11
UT	–	00:30	01:32 02:06	01:32 02:06	–	01:31	16:54	16:54
Параметры <i>sfe</i> и <i>CME</i>	МУВ5 9.11.2004 г. 18:20				МУВ6 11.11.2004 г. 16:40			
	<i>sfe</i>							
	<i>E1</i>	<i>E4</i>	<i>H</i>	<i>I</i>	<i>E1</i>	<i>E4</i>	<i>H</i>	<i>I</i>
Дата	07.11	7.11	01.11	08.11	–	08.11	–	09.11 10.11
UT	15:42	15:10	–	02:23	–	03:00	–	17:05 01:59
Ф, град.	N07	N03	–	N05–10	–	N03	–	N07 N09
Λ, град.	W17	W13	–	W18–35	–	W28	–	W51 W49
Балл	<i>2B/X2</i>	<i>X2</i>	<i>TF</i>	Серия 10-ти <i>sf-1n</i>	–	<i>sf/C8.0</i>	–	<i>2n</i> <i>2b</i>
	<i>CME</i>							
Тип	halo	halo	–	halo + серия 3-х <i>CME</i>	–	halo –	–	halo halo
Дата	–	7.11.	07.11.	8.11.	–	8.11.	9.11 10.11	9.11 10.11
UT	–	13:31	16:54	03:54	–	04:06	17:26 02:26	17:26 02:26

Примечание: Колонки 2–5 по определениям соответственно в работах Ермолаев и др. [2005, стр. 725], Ермолаев и др. [2005, стр. 736], Nagai et al. [2007] и в данной статье. Моменты наблюдения МУВ по ИСЗ ACE.

Таблица 2. Подтверждение (+) и неподтверждение (–) привязки МУВ к солнечным источникам результатами нашей работы

Авторы	МУВ1	МУВ2	МУВ3	МУВ4	МУВ5	МУВ6
Ермолаев и др. [2005] (<i>E1</i>)	–	–	+		–	
Ермолаев и др. [2005] (<i>E4</i>)	–	–	–	–	–	–
Harra et al. [2007] (<i>H</i>)	+		+	–	–	+
Bisi et al. [2008]				–	–	

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

В таблице 1 сопоставлены результаты идентификации солнечных источников МУВ, полученные и приведенные в табл. 1 (*E1*) и табл. 4 (*E4*) статьи Ермолаева и др. [2005], в статье Harra et al. [2007] – (*H*) и в данной работе (*И*) – последняя колонка.

3.1. Солнечные источники МУВ1 7.11.2004 г., 02:00 UT

В АО 10696 (N10, E20) 4.11.2004 г. в интервале 21:47–23:52 UT наблюдалась вспышка балла 1*n*, сопровождавшаяся, в конце этого интервала (22:53–23:26), рентгеновской вспышкой M5.4, эрупцией и уярчением [Wang et al., 2007, табл. 2] трансэкваториальной петли между АО 10696 и 10695 и появлением в 23:30 UT СМЕ [Harra et al., 2007]. Через 52 ч после начала вспышки 1*n* около Земли появилась МУВ1 с нормалью к ударному фронту ($\varphi_N = 205^\circ$, $\theta_N = -10^\circ$), согласующейся с направлением распространения от этой вспышки к Земле.

3.2. Солнечные источники МУВ2 7.11.2004 г., 10:00 UT

В АО 10696 (N07, E15) 5.11.2004 г. в интервале 11:28–12:08 UT наблюдалась вспышка балла 1*b*; в 12:06 UT появился СМЕ и через 46 ч у Земли наблюдалась МУВ2 с направлением прихода ударного фронта ($\varphi_N = 210^\circ$, $\theta_N = -10^\circ$), идентичным с МУВ1.

3.3. Солнечные источники МУВ3 7.11.2004 г., 17:55 UT

В АО 10696 (N10, E08) 6.11.2004 г. в интервале 00:13–02:48 UT наблюдалась вспышка балла 2*n* [Ермолаев и др., 2005] (*E1* в табл. 1), с серией из трех рентгеновских вспышек M9.3, M5.9, M3.6 [Ермолаев и др., 2005; Harra et al., 2007] в интервалах соответственно 00:11–00:42, 00:44–01:10 и 01:40–01:57 (табл. 2, в работе [Wang et al., 2007]), причем первая из этих вспышек привела к частичной эрупции трансэкваториальной петли и последняя – к ее развитию и спорадическому свечению. Соответствующая серия двух СМЕ появи-

лась в 01:32 и 02:06 UT [Harra et al., 2007] в виде полного и частичного гало. Через ~42 ч после начала вспышки 2*n* у Земли появилась МУВ3 с направлением распространения ($\varphi_N = 200^\circ$, $\theta_N = -5^\circ$), почти идентичном направлению распространения МУВ1 и МУВ2.

3.4. Солнечные источники МУВ4, 9.11.2004 г., 09:15 UT

В АО 10696 (N09, W17) 7.11.2004 г. в 15:42–16:15 UT наблюдалась рентгеновская вспышка балла X2 [Harra et al., 2007; Wang et al., 2007] с одновременной эрупцией трансэкваториального филамента, возникновением трансэкваториальной двухленточной вспышки в крайнем ультрафиолете и последующим уярчением трансэкваториальных петель [Wang et al., 2007]. В 16:54 UT появился СМЕ [Harra et al., 2007] типа полного гало. Через 40 ч после начала вспышки и эрупции волокна к Земле пришла МУВ4 с ударным фронтом, сильно наклонным к плоскости эклиптики ($\varphi_N = 225^\circ$; $\theta_N = -60^\circ$). В тексте статьи Ермолаева и др. [2005, стр. 728] не исключается, что эта МУВ имела своим источником вспышку балла X2.

3.5. Солнечные источники МУВ5, 9.11.2004 г., 18:20 UT

В АО 10696 (N05–10; W18–28) 08.11.2004 г. в интервале 02:23–04:44 наблюдалась серия из 8-ми субвспышек, дополненная дуплетом вспышек балла 1*n* в 14:33 и 15:46 UT соответственно на N05 W33 и N08 W35. В трансэкваториальной активности [Wang et al., 2007] – развитие и спорадическое уярчение петель (03:25–03:36). Серия 4-х СМЕ сопровождала эти явления: полное гало в 03:54 и СМЕ в 07:32, 11:54 и 14:54 UT. Через 30 ч после начала этой серии к Земле пришла МУВ5 с нормалью к фронту ($\varphi_N = 170^\circ$, $\theta_N = -10^\circ$), согласующейся с локализацией этой серии на солнечном диске.

В тексте статьи [Harra et al., 2007] на стр. 109 предполагается, что МУВ5 имела своим солнечным источником эрупцию трансэкваториального волокна (см. 3.4). Это предположение использовано также при моделировании соответствующего межпланетного возмущения в статье [Bisi et al., 2008].

3.6. Солнечные источники МУВ6, 11.11.2004 г., 16:40 UT

В АО 10696 9.11.2004 г. (17:05–18:29) и 10.11.2004 г. (02:04–03:15) возник дублет мощных вспышек балла 2*n* и 3*b* соответственно в точках N07 W51 и N09 W49. В 17:26 и 02:26 UT наблюдался [Harra et al., 2007] дублет СМЕ. Через 40 ч к Земле пришла МУВ6 с нормалью $\varphi_N = 155^\circ$, $\theta_N = 10^\circ$, согласующейся с направлением распространения от вспышек.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Осуществлена независимая привязка серии из 6-ти головных межпланетных ударных волн, наблюдавшихся около Земли 7–11 ноября 2004 г. во время очень большой солнечно-земной бури. Использована в основном традиционная методика привязки [Иванов, 1995], в которой принимается во внимание радиус геоэффективности оптических вспышек $H\alpha$ с баллами $\geq 1n$ и направление распространения фронта волны относительно локализации вспышки, оцениваемое с помощью данных на ИСЗ по направлению нормали к фронту. Использование современных данных СМЕ, особенно типа гало, модифицирует эту методику и делает ее более надежной. В рассматриваемом случае задача облегчалась также тем, что все вспышки-источники – в одной АО 10696, и часть из них была сопряжена как с СМЕ типа halo, так и с трансэкваториальной волоконной и петельной активностью [Wang et al., 2007].

В таблице 1 сопоставлены конкретные результаты привязки каждой МУВ разными авторами, в табл. 2 – итог совпадений или несовпадений этих результатов. Как видно из этих таблиц, наши результаты лишь в одном случае подтверждают результаты предварительных определений [Ермолаев и др., 2005] и в трех случаях из пяти результаты более поздних определений [Harra et al., 2007].

Существенное расхождение возникло в наиболее сложном случае между нашими результатами в привязке МУВ4 и МУВ5 с одной стороны, и в привязке этих волн в работе [Harra et al., 2007] с другой. Эти авторы, а также Bisi et al. [2008] полагают, что за МУВ4 ответственна мощная рентгеновская вспышка балла X2, тогда как за МУВ5 – по преимуществу эрупция активного трансэкваториального волокна (TF).

Между тем по нашим определениям за МУВ4 ответственны совместно и эрупция волокна и вспышка X2, тогда как за МУВ5 отвечал необычайно сложный источник: серия из 10-ти субвспышек и вспышек, сопровождавшаяся серией из 4-х СМЕ, с одним из них типа полного гало.

Однако окончательный выбор между этими двумя точками зрения может быть сделан только после полного анализа динамики, структуры и

конфигурации коронального и межпланетного МГД-возмущения, распространявшегося вслед за МУВ4 и МУВ5. Варианты такого анализа, на наш взгляд предварительные, имеются в публикациях Ермолаева и др. [2005], Wang et al. [2007], Harra et al. [2007], Dasso et al. [2007], Longcope et al. [2007], Pohjolainen et al. [2007], Bisi et al. [2008].

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методически независимо от предыдущих работ произведена привязка к солнечным источникам 6-ти межпланетных ударных волн, наблюдавшихся вблизи Земли 7–11 ноября 2004 г. во время сильной гелиосферной бури. В 3-х случаях подтверждаются результаты привязки в работе Harra et al. [2007]. В двух, наиболее сложных случаях (4-ая и 5-я волны), наши результаты отличаются от результатов этих авторов, что существенно для интерпретации и моделирования соответствующих МГД-возмущений.

Благодарю N. Ness'a и CDA Web за данные об измерениях ММП на ИСЗ ACE и данные о СМЕ, МЦД Solar Data NOAA – за данные о солнечных вспышках и волокнах, А.И. Завойкину – за помощь в подготовке статьи.

Работа частично поддержана Программой фундаментальных исследований Президиума РАН VI.15 “Плазменные процессы в солнечной системе”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ермолаев Ю.И., Зелёный Л.М., Застенкер Г.Н. и др. Год спустя: гелиосферные и магнитосферные возмущения в ноябре 2004 г. // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 45. № 6. С. 723–763. 2005.
- Иванов К.Г. Солнечные источники межпланетных ударных волн 1978 г. // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 35. № 3. С. 23–31. 1995.
- Иванов К.Г. Сверхконцентрация фотосферных источников крупномасштабного открытого магнитного поля Солнца в главной зоне активных долгот, блокировка дифференциального вращения, возникновение четырехсекторной структуры: 2. Геоэффективность // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 50. № 1. С. 3–16. 2010.
- Иванов К.Г. Вытеснение крупномасштабных открытых магнитных полей Солнца из зоны активных долгот и гелиосферная буря 3–10 ноября 2004 г.: 1. Динамика поля и солнечная активность // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 50. № 3. С. 298–310. 2010а.
- Иванов К.Г. Вытеснение... 2. “Взрыв” “сингулярности”, динамика пятнообразования и энерговыделения // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 50. № 6. С. 723–738. 2010б.
- Черток И.М. Крупномасштабная активность в мощных эруптивных событиях ноября 2004 г. по данным SOHO // Астрон. журн. Т. 83. № 1. С. 76–87. 2006.

- *Bisi M.M., Jackson B.V., Hick P.P., Buffington A., Odstrcil D., Clover J.M.* Three-dimensional reconstructions of the Early November 2004 coordinated data analysis workshop geomagnetic storms: Analysis of STELab IPS speed and SMEI density data // *J. Geophys. Res.* V. 113. A00A11, doi: 10.1029/2008JAO13222.2008.
- *Dasso Nakwackl M.S., Demoulin P., Mandrini C.H.* Progressive transformation of a flux rope to an ICME // *Solar Phys.* V. 244. № 1. P. 115–137. 2007.
- *Gopalswamy N., Akiyama S., Yashiro S.* Major solar flares without Coronal Mass Ejections // *Proc. IAU Symposium Universal Heliospheric Processes.* № 257. 2008.
- *Harra L.K., Grouker N.U., Mandrini C.H. et al.* How does large flaring activity from the same region produce oppositely directed magnetic clouds? // *Solar Phys.* V. 244. № 1. P. 95–114. 2007.
- *Longcope D., Beveridge C., Oiu J., Ravindra B., Barnes, Dasso S.* Modeling and measuring the flux reconnected and ejected by the two ribbon Flare/CME event on 7 November 2004 // *Solar Phys.* V. 244. № 1. P. 45–73. 2007.
- *Pohjolainen S., Driel-Gesztelyi L., Culhane J.L., Manoharan P.H., Elliott H.A.* CME propagation characteristics from radio observations // *Solar Phys.* V. 244. № 1. P. 167–188. 2007.
- *Wang J., Zhang Y., Zhou G., Harra L.K., Williams D.R., Jiang Y.* Solar trans-equatorial activity // *Solar Phys.* V. 244. № 1. P. 75–94. 2007.
- *Williams D.R., Torok T., Demoulin P., Driel-Gesztelyi L., Kleim B.* Eruption of kink-unstable filament in NOAA active region 10696 // *Astrophys. J.* V. 628. L163–L166. 2005.