Солнечные вспышечные суперсобытия: условия происхождения и энергетические пределы реализации

В. Н. Ишков 1,2

Получено 4 мая 2016 г.; принято 5 мая 2016 г.; опубликовано 16 мая 2016 г.

Солнечные вспышечные события являются основным фактором воздействия на околоземное космическое пространство, состояние которого определяет практически все стороны биологического и технологического существования нашей цивилизации. Поэтому количественное определение максимально возможной энергии этих событий на данном этапе развития Солнца является ключевым вопросом солнечной физики. Наиболее мощные солнечные вспышки за время научных наблюдений достигали энергий, превышающих 10³² эрг, до 10³³ эрг, тогда как на активных солнцеподобных звездах она достигала 10³⁶ эрг. Учитывая, что осуществление солнечных вспышек есть результат взаимодействия нового магнитного потока с уже существующим магнитным полем активной области, зная наибольшую наблюдаемую площадь групп солнечных пятен (магнитный поток), и предполагая возможность всплытия вторичного магнитного потока подобной величины в данной группе пятен и, как результат, осуществление единственной вспышки, суммировавшей всю полученную энергию, можно оценить максимальный выход энергии от такого вспышечного события. Результат показывает, что энергия такого фантастического события будет лишь в несколько раз превышать уже наблюдаемые солнечные суперсобытия и не принесет катастрофических последствий для нашей цивилизации. КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Солнце; вспышечная активность; солнечные циклы; солнечно-земные связи.

Ссылка: Ишков, В. Н. (2016), Солнечные вспышечные суперсобытия: условия происхождения и энергетические пределы реализации, *Вестник ОНЗ РАН, 8*, NZ5001, doi:10.2205/2016NZ000126.

1. Введение

В последние несколько лет увеличился интерес исследователей к возможности нашей ближайшей звезды в ходе своего развития производить суперэкстремальные вспышечные события, настолько мощные, чтобы нанести фатальный урон технологическим системам нашей цивилизации, уничтожить озоновый слой, защищающий живые организмы от губительных рентгеновского и ультрафиолетового излучений и/или полностью уничтожить атмосферу и жизнь на Земле. Вопрос не новый: на эту тему Р. Желязны и Т. Томасом был написан роман "Вспышка" (1992 г.), в котором описывалась ситуация будущего, в котором технологически развитая земная цивилизация попала под удар последовательных возмущений гигантской солнечной вспышки и, достаточно точно (на уровне современного знания), описана цепочка последовавших событий.

¹ИЗМИРАН, Москва, Россия

© 2016 Геофизический центр РАН.

http://onznews.wdcb.ru/doi/2016NZ000126-res.html

Современный всплеск интереса к этому вопросу вызван:

- наблюдениями • послелними вспышечных cvперсобытий у достаточно близких солнцеподобных звезд, особенно у тех, характеристики которых близки к солнечным - это медленно вращающиеся (период вращения не менее 25 суток), примерно одного возраста с Солнцем $(4, 6-6 \times 10^9 \text{ лет}), с температурой поверхности 5600$ $K < T_{eff} < 6000 K$. Энергетика вспышек на таких звездах (на 2015 г. – 4 звезды) на порядок больше $(5, 0 \times 10^{34}; 2, 4 \times 10^{34}; 9, 9 \times 10^{33}$ и $4, 4 \times 10^{34}$ erg) (http://onznews.wdcb.ru/news12/info 120106.html; http://arxiv.org/pdf/1308.1480v2.pdf), чем самые мощные вспышечные события, наблюдаемые на Солнце;
- последними результатами исследований изотопов кернов антарктического и гренландского ледников (³H, ⁷Be, ¹⁰Be и ³⁶Cl), колец деревьев и коралловых отложений (¹⁴C/¹⁰Be), показавшими большие быстрые всплески увеличения радиоизотопов в 774–775 и 993 годах, которые часть исследователей связывают с супервспышками на Солнце, хотя

²ГЦ РАН, Москва, Россия

самые экстремальные осуществившиеся вспышечные события соответствующих возрастаний не дают [*Miyake et al.*, 2012; *Shibata et al.*, 2013; *Smart et al.*, 2016; *Wolff et al.*, 2012, 2016].

Условия возникновения экстремальных вспышечных событий Солнце на бырассмотрены ли уже автором в сообщении http://onznews.wdcb.ru/news12/info 120106.html, где объяснялись детали определения рентгеновского класса вспышек, приборные ограничения его реального измерения и рассмотрена современная шкала геоэффективности солнечных активных явлений. В этой заметке будут более детально рассмотрены вопросы энергетических пределов осуществления вспышечных событий на Солнце. Прежде всего примем во внимание то обстоятельство, что наша звезда Солнце – типичная рядовая звезда-карлик спектрального класса G2 – находится в средней части главной последовательности на диаграмме спектр-светимость (диаграмма Герцшпрунга-Рассела), на которой располагаются стационарные звезды, практически не изменяя своей светимости в течение десятков миллионов лет.

2. Солнечные вспышечные события

При оценке предельно возможного по мощности солнечного вспышечного события ограничимся только наблюдательными данными, полученными в процессе исследования солнечной активности (СА), без привлечения каких-либо модельных представлений, которые основываются на теориях, не выходящих на реально работающий прогностический уровень как в отношении вспышечных событий, так и в отношении характеристик солнечных циклов (СЦ).

Определим понятие солнечного вспышечного события как взрывного процесса выделения энергии во всех диапазонах электромагнитного и корпускулярного излучений со всеми сопутствующими динамическими явлениями, включая распространение возмущения во всех слоях солнечной атмосферы и корональным выбросом вещества.

На современном этапе развития физики Солнца стало понятным, что все эволюционное многообразие наблюдаемых образований на Солнце является следствием всплытия магнитных потоков, от величины и скорости всплытия которых зависят размеры и времена существования магнитных структур. Само явление активной области (AO) можно рассматривать как эволюцию одного или нескольких всплывающих магнитных потоков ($\geq 10^{22}$ Mx), одновременно или последовательно появляющихся на ограниченном участке атмосферы Солнца со средним или малым темпом всплытия ($\sim 10^{16}$ – 10^{17} Mx/s). В это время активная область проходит развитие от появления первых признаков флоккула (яркий участок хромосферы Солнца), через стадию образования, развития и распада пятен, до полного исчезновения флоккула. Нужно заметить, что низкая, "эволюционная" скорость всплытия приводит лишь к росту площадей групп пятен, не вызывая роста вспышечной продуктивности. Отсюда следует, что наблюдения на звездах очень больших пятен с площадями 0,003–0,03 от видимой полусферы еще не говорят о способности данной звезды осуществлять супервспышки. Наибольшая за все время наблюдений Солнца площадь группы пятен (соответственно, наибольший магнитный поток) наблюдалась в апреле 1947 г. (18 солнечный цикл), когда за три оборота Солнца площадь группы пятен достигла величины 6170 миллионных долей полусферы (мдп), что соответствует магнитному потоку ~ 1, 8 × 10²³ Mx (Рис. 1).

Осуществление солнечных вспышечных событий обеспечивается взаимодействием новых всплывающих магнитных потоков в границах АО с уже существующим магнитным полем и представляет собой самостоятельный процесс внутри общей эволюции АО [Ишков, 1998]. Этот физический процесс имеет вполне конкретные начало всплытие нового магнитного потока; максимум - период осуществления серии вспышек (~ 55 часов); конец полная реализация энергии всплывшего магнитного потока. Ограниченный по времени, такой процесс может ускорить эволюцию АО, но, в общем случае, такое влияние можно считать несущественным, так как расходуется только энергия, принесенная именно новым магнитным потоком. Существенным обстоятельством является то, что вспышечные события всегда происходят сериями, семействами во временных рамках реализации энергии всплывающего магнитного потока. Для осуществления больших солнечных вспышечных событий важна не сложность магнитной конфигурации, а динамика, быстрая эволюция нового всплывающего магнитного потока, т. е. необходимо сильное изменение структуры магнитного поля АО, причем наиболее статистически обоснованным временем подготовки вспышечной серии является интервал времени не более 1-3 суток с момента появления первых признаков нового магнитного потока, что дает наблюдателю возможность прогноза и время для его осуществления. Любое всплытие нового магнитного потока приводит к увеличению вспышечной активности, но для осуществления больших геоэффективных вспышек необходимо, чтобы всплывающий магнитный поток был достаточно большим (> 10^{22} Mx) и скорость его всплытия была не менее 10^{18} Mx/s (http://onznews.wdcb.ru/news12/info 120106.html).

Солнечные вспышечные суперсобытия можно определить как максимально возможные мощные вспышечные события на Солнце, которые осуществляются при максимально возможном по величине и скорости всплытия магнитном потоке в развитой АО с максимально возможной наблюдаемой величиной магнитного поля.

3. Эволюционные характеристики

Рассмотрим эволюционные характеристики наиболее вспышечно-активных групп пятен, в которых осуществились самые мощные вспышечные события за всю историю достоверных наблюдений, включив сюда и рекорд-





6.04.1947 г.

8.04.1947 г.



Рис. 1. Зарисовка группы пятен апреля 1947 года в момент наибольшего развития (солнечная обсерватория Kanzelhöhe, Австрия, http://cesar.kso.ac.at/sunspot_drawings/1947/).

Carrington 520	N20W12L085, CMP 31, 6.08.1859; Spmax = 2300 mvh, FKC, $\gamma,$ R2; IB Ə I 27.08 – $X^{>20}$ IB Ə II 01.09 – $X^{>20}$
AR6659	$ \begin{split} & \text{N31L248; CMP 09, 5.06.1991; Sp}_{\max} = 2240 \text{ mvh; FKC, } \delta \text{, R1;} \\ & \text{XRI} \geq 86, 5; \ X_6^{>12.5} + \text{M}_{26} + \text{C}_{39}; \ 4_1 + 3_3 + 2_6 + 1_{20} + \text{S}_{73}; \\ & \text{IB9 I (21 h) 01-02.06} - \text{X}_1^{>12.5} + \text{M}_2 \\ & \text{IB9 II (46 h) 04-06.06} - \text{X}_2^{>12.5} + \text{M}_2 \\ & \text{IB9 III (67 h) 09-11.06} - \text{X}_2^{>12.5} + \text{M}_{11} \\ & \text{IB9 IV (39 h) 13-15.06} - \text{X}_1^{>12.5} + \text{M}_8 \end{split} $
Greenwich 1488603	S24.5L084, CMP 07, 5.04.1947; Sp _{max} = 6132 mvh, FKI, R4; IIB Ə I – ?
AR5395	$ \begin{split} & \text{N34L257, CMP 12, 7.03.1989; Sp}_{\max} = 3600 \text{ mvh, FKC, } \delta \text{, R1;} \\ & \text{XRI} \geq 61.5; \ X_{11}^{>17.5} + M_{48} + C_{47}; 3_5 + 2_{21} + 1_{37} + S_{132}; \\ & \text{IIB9 I (42 h) } 6-7.03 - X_2^{>12.5} + M_6^{5.7} \\ & \text{IIB9 II (70 h) } 9-12.03 - X_4^{4.5} + M_{18}^{9.7} \\ & \text{IIB9 III (44 h) } 12-14.03 - X_2^{1.2} + M_{10}^{6.3} \\ & \text{IIB9 IV (48 h) } 16-17.03 - X_3^{6.5} + M_8^{9.4} \end{split} $
AR10486	$\begin{split} & \text{S17L283, CMP 29, 3.10.03; Sp}_{\max} = 2610 \text{ mvh, FKC, } \delta \text{, R1;} \\ & \text{XRI} \geq 62.56\text{: } X_7 >^{17.5} + \text{M}_{16} + \text{C}_{16}\text{; } 4_1 + 3_2 + 1_7 + \text{S}_{49}\text{;} \\ & \text{IB9 I (59 h) } 22\text{-}24.10 - \text{X}_2^{5.4} + \text{M}_6^{9.9} \\ & \text{IB9 II (59 h) } 27\text{-}29.10 - \text{X}_2^{17.4} + \text{M}_4^{6.7} \\ & \text{IB9 III (63 h) } 02\text{-}05.11 - \text{X}_2^{>17.5} + \text{M}_6^{5.3} \end{split}$

Табл. 1. Эволюционные и вспышечные характеристики активных областей – генераторов самых мощных солнечных вспышечных событий (кроме Greenwich 1488603)

Примечание:Краткая формула основных эволюционных и вспышечных характеристик АО: порядковые номера групп пятен по каталогам Кэррингтона, обсерватории Гринвич и в системе Службы Солнца NOAA, США (AR); гелиокоординаты; площадь пятен (Sp), эволюционный и магнитный классы группы пятен в момент максимального развития, возраст в оборотах Солнца (R); XRI – рентгеновский вспышечный индекс: сумма всех вспышек данной АО, где вспышки класса X дают 1, а вспышки класса M – 0,1; количество солнечных вспышек по рентгеновскому баллу X + M + C, где нижний индекс – количество вспышек данного балла, верхний индекс – рентгеновский балл самой большой вспышки; количество солнечных вспышек по оптическому баллу с теми же нижним и верхним индексами; дата, время, продолжительность и количество вспышек периодов вспышечного энерговыделения (ПВЭ).

смена по площади – группу пятен апреля 1947 г., хотя вспышечная активность ее была достаточно низкой. В Табл. 1 в виде кратких формул приводятся характеристики солнечных АО, в которых осуществились самые мощные вспышечные события.

По общему мнению, наиболее мощное солнечное вспышечное событие осуществилось 1.09.1859 г. (Carrington 520), возмущение от которого достигло Земли через 17 часов 40 мин. и вызвало экстремальную магнитную бурю, во время которой в Америке и Европе были зарегистрированы серьезные нарушения проводной телеграфной связи (подводная и подземная кабельная сеть), которые продолжались несколько часов. Полярные сияния наблюдались в Гаване и на Гавайях (http://onznews.wdcb.ru/news12/info 120106.html). Xaрактеристики АО приведены в Табл. 1, из которой видно, что это была очень большая группа пятен, но ее размеры, сложность магнитной конфигурации, эволюционный класс и периоды вспышечного энерговыделения вполне укладываются в семейство самых мощных вспышечных AO.

Одна из наибольших по площади за последние 6 солнечных циклов группа пятен AR5395 (N34L257) дала возможность проследить последовательные всплытия 4 новых больших магнитных структур, сравнимых по площади с первоначальной группой пятен, непосредственно в пространстве АО, каждая из которых приводила к своему периоду вспышечного энерговыделения (Табл. 1). Это обеспечило реализацию вспышек больших и средних баллов за все время прохождения этой АО по видимому диску Солнца.

Активная область июня 1991 г. (AR6659) является несомненным лидером по количеству и мощности солнечных вспышек за всю историю наблюдения Солнца, в которой за две недели осуществились 11 больших вспышеч, среди которых было 6 экстремальных вспышечных событий (Табл. 2). В экстремальных вспышках 1, 4 и 6.06 (X \geq 12.5) время насыщения рентгеновских детекторов достигло 26 минут (http://onznews.wdcb.ru/news12/info_120106.html), причем в последних двух были зарегистрированы самые интенсивные γ -всплески и потоки солнечных нейтронов. После экстремальных событий 11 и 15.06 (X \geq 12,5) на наземных мониторах наблюдались протоны очень больших (> 1 ГэВ) энергий (GLE-события).

Второе по мощности экстремальное вспышечное собы-

N <u>o</u>	ПЦМ	AO	Φ°	L°	$\mathrm{Sp}_{\mathrm{max}}$	R, S, G	XRI	$M \pm y$
1	09.06.1991	6659	N31	248	2300	R5/S4/G4	> 86, 5	+2
2	29.10.2003	10486	S17	354	2610	R5/S4/G5	> 62, 56	+3, 5
3	12.03.1989	5395	N34	257	3600	R5/S4/G5	> 57, 0	-0, 5
4	14.09.2005	10808	S09	229	1430	R5/S3/G3	49,21	5, 5
5	08.06.1982	3763	S08	086	1270	R4/S2/G2	42, 4	+2,5
6	04.07.1974	0433	S14	156	1334	R4/S3/G5	$\geq 41, 4$	+5, 5
7	16.12.1982	4025	S06	089	500	R4/S2/G3	36,7	+3
8	23.03.1991	6555	S23	188	2530	R4/S4/G4	32, 6	+1, 5
9	15.07.1982	3804	N14	322	2960	R4/S4/G5	31, 6	+2,5
10	14.07.1978	1203	N18	170	1600	m R5/S2/G2	29,7	-1
11	10.04.2001	9415	S22	359	880	R4/S3/G4	28,73	+1
12	08.08.1989	5629	S17	076	1320	R5/S4/G4	> 26, 8	-0, 5
13	04.08.1972	0331	N12	010	1330	R5/S4/G5	$\stackrel{-}{>} 26, 0$	+3,5
14	11.11.1980	2779	S11	098	2000	R3/S1/G4	25,9	+1
15	28.03.2001	9393	N20	152	2440	m R5/S2/G5	> 25,74	+1
16	17.05.1990	6063	N34	321	940	R3/S3/G2	23,1	+1
17	12.01.1989	5312	S31	308	1800	R3/S1/G2	22, 4	-0, 5
18	15.01.2005	10720	N13	179	1630	R4/S3/G4	21, 5	+4,7
19	11.12.2006	10930	S06	009	680	R4/S3/G4	21,44	+6, 6
20	28.04.1984	4474	S13	334	2160	R5/S3/G3	21, 2	+5
21	23.10.2016	12192	S13	248	2750	m R5/S0/G0	20,45	+0,5

Табл. 2. Наиболее вспышечно-продуктивные АО 1970-2016 г.

Примечание: ПЦМ – время прохождения центрального меридиана Солнца данной АО; АО – порядковый номер активной области в системе NOAA; Ф°– гелиоширота центра АО; L°– абсолютная (кэррингтоновская) гелиодолгота центра АО; XRI – рентгеновский вспышечный индекс, сумма всех вспышек данной АО, где вспышки класса X дают 1, а вспышки класса М – 0.1; R, S, G – интенсивность возмущения околоземного космического пространства по пятибалльной шкале NOAA (http://onznews.wdcb.ru/news12/info_120106.html); M ± y – временной интервал в годах от максимума соответствующего солнечного цикла.

тие осуществилось 4.11.2003 г. в самой большой группе пятен прошедшего 23 цикла СА в октябре–ноябре 2003 г. (AR10486), в которой произошло еще два экстремальных вспышечных события 28 и 29.10 [Ишков, 2006]. Следствием последних событий в околоземном космическом пространстве стало осуществление экстремального солнечного протонного события (S4–29500 p.f.u.) и очень большой магнитной бури (G5–Ap = 253).

Для справки приведем список самых вспышечнопродуктивных AO за последние 5 циклов солнечной активности с того времени, когда стало возможным определять рентгеновский класс вспышек с указанием их характеристик и геоэффективности (Табл. 2).

4. Энергетические оценки

Рассмотренные примеры позволяют сделать энергетические оценки рассмотренных наиболее высокопродуктивных вспышечно-активных групп пятен, в которых произошли самые мощные за всю историю солнечных наблюдений вспышечные события.

В работе [Gopalswamy et al., 2005] была произведена оценка всех видов энергий для группы пятен AR10486. Потенциальная энергия AO и кинетическая энергия коронального выброса вещества (KBB) составили: объем $10^{31}~{\rm cm}^3~(300\times 300\times 300~{\rm arcsec}^3),$ потенциальная энергия (PE) $\sim 4,57\times 10^{33}$ erg, полная магнитная энергия $\sim 2~{\rm PE}$ $\sim 9,2\times 10^{33}$ erg, свободная энергия $\sim 4,6\times 10^{33}$ erg. Кинетическая энергия коронального выброса вещества $\sim 1,2\times 10^{33}$ erg, т. е. $\sim 1/4$ свободной магнитной энергии уносится KBB.

Все другие формы энергии в сумме на порядок ниже $E_{\rm KBB}$ [*Emslie et al.*, 2012]. Напомним, что светимость Солнца – 3, 83 × 10³³ erg/s.

Для других рассмотренных АО июня 1991 г. и августа– сентября 1859 г. расклад энергий при примерно равном объеме активной области будет иметь близкие величины. Для АО марта 1989 г. (Sp = 3600 мдп), значение свободной энергии увеличится до 6 × 10³³ эрг. Предельный магнитный поток "эволюционного" типа, образовавший группу пятен апреля 1947 г., составил $1,8 \times 10^{23}$ Мх, что дает для свободной энерги
и $1,1\times 10^{34}$ эрг. Если предположить, что такой магнитный поток будет "вспышечного" типа со скоростью всплытия 10¹⁷ Mx/s и реализуется в одной вспышке, ее полная энергия может составить 3×10^{34} эрг. Если энергия, выделившаяся в кэррингтоновской вспышке и во вспышке 4.11.2003, по [Emslie et al., 2012] составляла $\sim 2, 8 \times (10^{33} - 10^{34})$ эрг, можно сделать вывод, что суперэкстремальные солнечные вспышки не могут значимо превышать уже осуществившиеся за время научных наблюдений самые мощные вспышки.

5. Обсуждение результатов

Напомним, что исследование достоверного ряда данных [Ишков, 2013] приводит к вполне определенному сценарию устойчивого развития солнечной цикличности в последние 180 лет, в котором нет места "странностям", присущим восстановленному ряду (1750–1849 г.). Данный сценарий предусматривает регулярную смену режимов солнечной пятнообразовательной деятельности и четко разбивается на эпохи "пониженной" (СЦ 12–16 и $24 \rightarrow$) и "повышенной" (*←* 8–10 и 18–22) СА, между которыми в течение ~ 1,5 СЦ происходит смена режима генерации магнитных полей в пятнообразовательной зоне Солнца к соответствующей эпохе. Эпохи принципиально отличаются по наблюдаемым популяциям групп пятен, по сглаженным средним величинам площадей: для эпохи "пониженной" СА они почти в два раза меньше, чем для эпохи "повышенной" [Ишков, 2013]. Текущий 24 СЦ открывает вторую эпоху "пониженной" СА, которая продлится 5 СЦ, когда будут реализовываться только СЦ низкой и средней величины.

Переходные периоды между эпохами СА являются важнейшей составляющей этого сценария солнечной цикличности. Если в разные эпохи СА общее магнитное поле Солнца держится примерно на одной величине, соответствующей эпохе, то в переходные периоды оно меняется, переходя за сравнительно короткое время (1 СЦ) с одного уровня на другой, полностью изменяя картину пятнообразовательной деятельности. Базовыми циклами переходных периодов явились 11, 17 и 23. Последний из них пришелся на космическую эру, что обеспечило его детальное изучение. Из наиболее ярких признаков перестройки режима пятнообразования можно отметить наблюдаемое с 1999 по 2010 г. (12 лет) падение (> 1000 Гс) напряженности магнитного поля в тенях пятен [Livingston et al., 2012], отражающее перестройку магнитных полей к условиям последующей эпохи "пониженной" СА. Смена режима генерации магнитного поля в зоне пятнообразования оказывает существенное влияние на СА, давая возможность осуществления наиболее мощных ее выражений: появление на фазе роста 18 солнечного цикла гигантских АО; осуществление всех наиболее мощных вспышечных суперсобытий (27.08-2.09.1859 г. - 10 СЦ, 1-15.06.1991 г. - 22 СЦ, 28.10-4.11.2003 г. -23 СЦ); регистрация экстремальных по потокам и энергиям (GLE-события) солнечных протонов.

6. Заключение

Итак, исходя из оценки максимально возможных на Солнце всплывающих вспышечных магнитных потоков и максимально возможных величин магнитного поля в АО, учитывая тот факт, что взаимодействие этих полей всегда приводит к реализации семейства вспышек различных баллов и мощностей в ограниченный промежуток времени, можно с большой долей уверенности утверждать, что на данном этапе эволюции Солнца суперэкстремальные солнечные вспышки не могут значимо превышать уже осуществившиеся за время научных наблюдений самые мощные вспышки, и, соответственно, при принятии современных мер защиты, катастрофических последствий для цивилизации и жизни на Земле быть не должно.

Такие суперсобытия, с большой долей вероятности, происходят в переходные периоды перестройки режима пятнообразования между эпохами.

Можно предположить, что для каждой из эпох существует свой порог максимально возможного по мощности солнечного вспышечного события. Так, для последней эпохи "повышенной" солнечной активности это могут быть экстремальные вспышечные события XI 1960 г., IV 1984 г., VIII 1972 г.

Литература

- Ишков, В. Н. (1998), Всплывающие магнитные потоки ключ к прогнозу больших солнечных вспышек, Изв. РАН, Серия физическая, 62, No. 9, 1835–1839.
- Ишков, В. Н. (2006), Эволюция и вспышечная продуктивность активных областей в октябре–ноябре 2003 г., *Астр. Вестник, 40*, No. 2, 117–124.
- Ишков, В. Н. (2013), Периоды "пониженной" и "повышенной" СА: наблюдательные особенности и ключевые факты, Солнечная и солнечно-земная физика – 2013, под ред. Ю. А. Наговицина р. 111–114, Изд. ВВМ, Санкт-Петербург.
- Emslie, A., B. Dennis, A. Shih (2012), Global energetics of 38 large solar eruptive events, Astroph. J., 759, 18, doi:10.1088/0004-637X/759/1/71
- Gopalswamy, N., S. Yashiro, Y. Liu, G. Michalek, A. Vourlidas, M. Kaiser, R. Howard (2005), Coronal mass ejections and other extreme characteristics of the 2003 October–November solar eruptions, J. Geophys. Res., 110, A09S15, doi:10.1029/ 2004ja010958
- Livingston, W., M. J. Penn, L. Svalgaard (2012), Decreasing sunspot magnetic fields explain unique 10.7 cm radio flux, Astrophys. J. Lett., 757, L8, doi:10.1088/2041-8205/757/1/L8
- Miyake, F., K. Nagaya, K. Masuda, T. Nakamura (2012), A signature of cosmic-ray increase in ad 774–775 from tree rings in Japan, *Nature*, 486, 240, doi:10.1038/nature11123
- Shibata, K., et al. (2013), Can Superflares Occur on Our Sun?, Publ. Astron. Soc. of Japan, 65, 3, doi:10.1093/pasj/65.3.49
- Smart, D. F., M. A. Shea, A. L. Melott, C. M. Laird (2016), Reply to comment by E. W. Wolff et al. on "Low time resolution analysis of polar ice cores cannot detect impulsive nitrate events", *J. Geophys. Res. Space Physics*, 121, 1925–1933, doi:10.1002/ 2015JA021913
- Wolff, E., et al. (2012), The Carrington event not observed in most ice core nitrate records, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L08503, doi:10.1029/2012GL051603
- Wolff, E. W., M. Bigler, M. A. J. Curran, J. E. Dibb, M. M. Frey, M. Legrand, J. R. McConnell (2016), Comment on "Low time resolution analysis of polar ice cores cannot detect impulsive nitrate events" by D. F. Smart et al., J. Geophys. Res. Space Physics, 121, 1920–1924, doi:10.1002/2015JA021570

В. Н. Ишков, ИЗМИРАН 142190, Россия, г. Москва, г. Троицк, Калужское шоссе, д. 4. (ishkov@izmiran.ru, vitish@wdcb.ru)