

ПОВЕДЕНИЕ СКОРОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА В МЕЖПЛАНЕТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЯХ, СОЗДАЮЩИХ ФОРБУШ-ПОНИЖЕНИЯ

© 2020 г. А. А. Мелкумян^{1, *}, А. В. Белов^{2, **}, М. А. Абунина², А. А. Абунин²,
Е. А. Ерошенко², В. А. Оленева², В. Г. Янке²

¹Российский государственный университет нефти и газа
(национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина, г. Москва, Россия

²Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Россия

*e-mail: amelkumyan6@gmail.com

**e-mail: abelov@izmiran.ru

Поступила в редакцию 23.10.2019 г.

После доработки 15.01.2020 г.

Принята к публикации 23.01.2020 г.

Форбуш-понижения космических лучей обусловлены двумя типами солнечных источников: корональными дырами и корональными выбросами массы. В некоторых случаях идентификация солнечного источника с межпланетным возмущением, вызывающим Форбуш-понижение, затруднена и требует тщательного и детального анализа характеристик солнечного ветра. В этих случаях полезно сопоставить поведение протонной температуры и скорости солнечного ветра. В данной работе такое сопоставление проводилось на основе большого экспериментального материала, объединенного в базы данных ИЗМИРАН. Оказалось, что зависимость температуры от скорости для спокойного солнечного ветра имеет степенной характер с более крутым спектром в области низких скоростей ($V < 425$ км/с; показатель степени 3.37 ± 0.02), чем в области высоких скоростей ($V \geq 425$ км/с; показатель степени 2.21 ± 0.02). На основе полученной T – V зависимости, для каждого часа, для которого есть данные о параметрах солнечного ветра, с июля 1965 г. и по декабрь 2018 г. были вычислены ожидаемая протонная температура T_{exp} и температурный индекс $K_T = T_{\text{obs}}/T_{\text{exp}}$ (T_{obs} – наблюдаемая температура). Этот индекс аномально велик в областях взаимодействия разноразмерных потоков солнечного ветра и аномально мал внутри магнитных облаков, что позволяет использовать его для выделения связанных с этими межпланетными структурами Форбуш-понижений и для идентификации их солнечных источников.

DOI: 10.31857/S0016794020040100

1. ВВЕДЕНИЕ

Зависимость между протонной температурой T и скоростью V солнечного ветра исследовалась во многих работах. Для невозмущенного солнечного ветра отмечается положительная T – V корреляция, построены модели зависимости протонной температуры от скорости [Neugebauer and Snyder, 1966; Lopez and Freeman, 1986]. Показано, что в распространяющихся в межпланетном пространстве выбросах солнечного вещества (*Interplanetary Coronal Mass Ejections* – ICMEs) протонная температура ниже ожидаемого значения и не коррелирует со скоростью [Gosling et al., 1973; Richardson and Cane, 1995a; Neugebauer et al., 2003; Elliot et al., 2005]. Наличие большого экспериментального материала, накопленного за годы спутниковых измерений, позволяет исследовать временные и

пространственные вариации T – V зависимости [Lopez, 1987; Richardson and Cane, 1995b; Elliot et al., 2012, 2016; Watari, 2018].

В работе [Gosling et al., 1973] по результатам измерений Vela 3 было отмечено существование аномально низких значений протонной температуры (при высоких значениях скорости солнечного ветра), наблюдавшихся через 20–60 ч вслед за прохождением ударных волн. При этом плотность протонов была ниже нормальной, а отношение концентраций ионов гелия и водорода аномально высокое ($n_{\alpha}/n_p > 0.15$). Было показано, что такие наблюдения согласуются с возмущениями, связанными с выбросами массы во время больших солнечных вспышек и характеризующимися образованием “магнитной бутылки”, внутри которой адиабатическое охлаждение плазмы приводит к аномально низким температурам.

В работах [Lopez and Freeman, 1986; Lopez, 1987] строились модели зависимости протонной температуры от скорости для невозмущенного солнечного ветра. Было установлено, что характер зависимости меняется при скорости порядка 500 км/с (квадратичная зависимость для $V < 500$ км/с и линейная для $V \geq 500$ км/с), причем функциональная форма зависимости устойчива для всех солнечных циклов с 1966 по 1985 г. В работах [Richardson and Cane, 1995a, 1995b] исследовалась связь аномально низкой (по сравнению со спокойным солнечным ветром) протонной температуры с ICMEs. Для Helios 1, 2 и OMNI данных с 1965 по 1991 г., с использованием полученных в работе [Lopez, 1987] моделей зависимости температуры от скорости, рассчитывалась ожидаемая протонная температура T_{exp} , выделялись интервалы аномально низкой измеренной протонной температуры ($T_{\text{obs}} \leq 0.5 T_{\text{exp}}$) и анализировалась их связь с ICMEs. Было показано, что хотя часть интервалов с аномально низкой протонной температурой связана с гелиосферным плазменным слоем, температурные данные представляют простой и надежный путь для идентификации ICMEs.

В работе [Elliot et al., 2005] использовались измерения протонной температуры и скорости (ACE, 1998–2003 гг.) для получения формулы расчета ожидаемой протонной температуры T_{exp} . Для исключения из исходных данных наблюдений, связанных с ICMEs, использовались три критерия: a – низкие значения параметра бета (отношение давления плазмы к давлению магнитного поля $\beta < 0.1$); b – высокие значения отношения плотностей альфа частиц и протонов ($n_{\alpha}/n_p > 0.08$); c – высокие значения отношения плотностей ионов кислорода ($n_{O+7}/n_{O+6} > 1$). После удаления ICMEs, выбранных по этим критериям, выделялись области сжатия (рост скорости) и разрежения (уменьшение скорости). Полученные для обоих типов областей формулы вычисления ожидаемой протонной температуры T_{exp} линейные, но с разными коэффициентами регрессии. В работе [Elliot et al., 2012] был проведен пространственно-временной анализ вариаций T – V зависимости для солнечного ветра в отсутствие ICMEs (OMNI, 1965–2009 гг.). Было получено, что на расстоянии 1 а. е. T – V зависимость может быть представлена одной прямой в диапазоне скоростей, охватывающем как быстрый, так и медленный солнечный ветер, хотя иногда быстрый солнечный ветер от корональных дыр имеет другую T – V зависимость (например, большая корональная дыра 2003 г.). Было также показано, что параметры модели меняются с расстоянием и на 2.5 а. е. линейная зависимость уже не подходит. В работе [Elliot et al., 2016] исследовалось долгосрочное (OMNI, 1965–2015 гг.) изменение зависимости между протонной температурой и

скоростью. Было обнаружено, что с 1972 по 2010 г. крутизна наклона прямой T – V непрерывно падает, а с 2010 и по 2015 г. – имеет тренд к увеличению. В работе [Watari, 2018] представлены диаграммы рассеяния протонной температуры и скорости солнечного ветра для 23-го (1997–2004 гг.) и 24-го (2009–2016 гг.) солнечных циклов. Показано, что в обоих циклах наклон прямой, соединяющей средние значения температуры, меняется при скорости порядка 500 км/с; сделан вывод, что стабильность зависимости между протонной температурой и скоростью поддерживается даже при слабой солнечной активности в 24-м цикле.

Цель настоящей работы – на большом количестве материала получить связь между температурой и скоростью спокойного солнечного ветра и, на основе этой связи, разработать и опробовать метод выделения межпланетных возмущений, позволяющий получить дополнительные параметры для характеристики возмущений солнечного ветра, эффективно модулирующих космические лучи. Основная задача данной работы – сконструировать связанный с температурой числовой индекс, который поможет идентифицировать тип межпланетных возмущений, модулирующих космические лучи.

2. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

В настоящей работе использовались почасовые значения параметров межпланетной среды, взятые из базы OMNI (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html>), а также почасовые значения вариаций плотности и анизотропии космических лучей, рассчитанные по данным мировой сети нейтронных мониторов методом глобальной съемки для частиц жесткостью 10 ГВ [Белов и др., 2018]. Эти значения содержатся в базе данных вариаций космических лучей и сопутствующих параметров (*Variations of Cosmic Rays – VCR*), созданной и поддерживаемой в ИЗМИРАН [Belov et al., 1999; Asipenka et al., 2009; Абунина и др., 2013]. Для разработки и реализации предложенного в настоящей статье метода выделения межпланетных возмущений были использованы почасовые данные с 1 июля 1965 г. по 31 декабря 2018 г. Количество часов, для которых в базе данных есть сведения о межпланетном магнитном поле (ММП), протонной температуре и скорости солнечного ветра за этот период, составило $N_{\text{sum}} = 332153$ ч.

Обработка данных включала несколько последовательных этапов.

1) Выбор параметров солнечного ветра и их граничных значений для вычисления критерия возмущенности (*Disturbance Index – I_D*), определяющего наличие в исходных – данных ICMEs и

областей взаимодействия разноскоростных потоков солнечного ветра.

2) Вычисление почасовых значений I_D для всего массива данных; определение порогового значения I_{Dcrit} ; выделение невозмущенных периодов, соответствующих $I_D \geq I_{Dcrit}$.

3) Построение регрессионных моделей зависимости протонной температуры T от скорости V для невозмущенного солнечного ветра. Для расчетов использовались три модели: линейная ($T = a + bV$), квадратичная ($T = a + bV^2$) и степенная ($\lg T = a + b \lg V$).

4) Выбор оптимальной модели и вычисление ожидаемых значений протонной температуры T_{exp} по наблюдаемым значениям скорости V для всего массива данных.

5) Вычисление почасовых значений температурного индекса $K_T = T_{obs}/T_{exp}$ (T_{obs} – наблюдаемая протонная температура) для всего массива данных.

6) Анализ полученных значений температурного индекса для Форбуш-понижений (ФП), вызванных корональными выбросами массы или высокоскоростными потоками из корональных дыр, на примерах событий, представленных в базе данных Форбуш-эффектов и межпланетных возмущений (<http://spaceweather.izmiran.ru/eng/dbs.html>), созданной и поддерживаемой в ИЗМИРАН.

7) Определение критических значений индекса, разделяющих возмущенный и спокойный солнечный ветер; выделение отдельных межпланетных возмущений, соответствующих интервалам с аномально малыми или аномально большими значениями температурного индекса; идентификация выделенных межпланетных возмущений (область взаимодействия разноскоростных потоков солнечного ветра, ICME, магнитное облако, смешанное событие).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Так как космические лучи представляют собой, в основном, заряженные частицы, то их модуляция, главным образом, определяется свойствами ММП, а области дополнительной модуляции – это, как правило, области с усиленным и/или особым образом структурированным магнитным полем. Эти области возникают при взаимодействии потоков солнечного ветра с различными скоростями, например, перед высокоскоростными потоками плазмы из корональных дыр, а также на границах и внутри ICMEs, в частности, в магнитных облаках. Именно в таких областях наблюдается аномальное поведение температуры солнечного ветра: в областях взаимодействия разноскоростных потоков солнечного ветра температура, как правило, повышается, а внутри

ICMEs и в магнитных облаках – существенно понижается. Для того чтобы определить области с аномальной температурой, надо, прежде всего, понять, как связаны температура и скорость в нормальных условиях, то есть в спокойном солнечном ветре. В данном исследовании мы включаем области внутри высокоскоростных потоков из корональных дыр в понятие “нормальные условия”, поскольку эти области обычно характеризуются пониженным и регулярным магнитным полем [Hundhausen, 1977; Cranmer, 2009] и вызывают слабую дополнительную модуляцию космических лучей [Belov, 2009; Melkumyan et al., 2019].

Для предварительного исключения из исходных данных наблюдений, связанных с возмущенным солнечным ветром, был сконструирован и использован индекс возмущенности I_D , учитывающий признаки возмущенных областей, представленные в табл. 1. Спокойному солнечному ветру должны соответствовать невысокие значения межпланетного магнитного поля и его B_z -составляющей, а также положение магнитных силовых линий в “правильном” секторе; достаточно высокие значения параметра бета; относительно невысокие значения скорости солнечного ветра и низкие или умеренные ее почасовые изменения. Признаки возмущенного солнечного ветра: если величина хотя бы одного из этих параметров соответствует интервалу значений, указанному в табл. 1, то индекс возмущенности за данный час считался равным нулю ($I_D = 0$); индекс возмущенности соседнего часа считался равным единице ($I_D = 1$) и т.д. В общем случае, $I_D = n$, где n – интервал времени (в часах) от данного наблюдения до наблюдения с $I_D = 0$. Полученное распределение индекса возмущенности и анализ событий, связанных с межпланетными возмущениями разной природы, позволили выбрать критическое значение индекса возмущенности $I_{Dcrit} = 3$. Возмущенные периоды соответствовали $I_D = 0, 1, 2$; спокойный солнечный ветер $I_D \geq 3$. После исключения возмущенных областей из исходных данных, количество часов, когда наблюдался спокойный солнечный ветер, составило $N = 74368$ или 22.4% от всех наблюдений.

В таблице 2 представлены результаты расчетов линейной, квадратичной и степенной зависимости температуры T от скорости V для спокойного солнечного ветра. Степенная модель первоначально была выбрана, так как температура солнечного ветра меняется в широких пределах, однако было проверено несколько типов моделей. В табл. 2 представлены также значения коэффициентов корреляции между наблюдаемыми и рассчитанными значениями протонной температуры для каждой из трех моделей. Коэффициент корреляции для степенной модели ($r_1 = 0.792$) оказался значимо больше, чем для линейной ($r_2 =$

Таблица 1. Параметры солнечного ветра, используемые для исключения возмущенных областей

№	Параметр солнечного ветра	Значения параметра в возмущенных областях
1	Индукция ММП	$B > 7$ нТл
2	Модуль вертикальной составляющей индукции ММП	$ B_z > 3.5$ нТл
3	Отклонение силовой линии ММП	$B_x B_y > 0$
4	Скорость солнечного ветра	$V > 900$ км/с
5	Модуль почасового изменения скорости солнечного ветра	$ \Delta V > 35$ км/с
6	Параметр бета (отношение давления плазмы к давлению магнитного поля)	$\beta < 0.1$

Таблица 2. Линейная, квадратичная и степенная модели зависимости температуры от скорости для невозмущенного солнечного ветра

Зависимость	Модель	Количество наблюдений	Коэффициенты регрессии		Коэффициент корреляции
			a	b	
Линейная	$T = a + bV$	74368	-145194 ± 176	556.8 ± 1.7	0.771 ± 0.001
Квадратичная	$T = a + bV^2$	74368	-18191 ± 176	0.575 ± 0.002	0.771 ± 0.001
Степенная	$\lg T = a + b \lg V$	74368	-2.183 ± 0.001	2.68 ± 0.01	0.792 ± 0.001

$= 0.771$) и квадратичной ($r_3 = 0.771$). Статистическая значимость разности между двумя коэффициентами корреляции проверялась с помощью z -статистики; полученное значение $z = 10.41$ позволяет утверждать, что $r_1 > r_2$ и $r_1 > r_3$ с уровнем значимости $p < 0.0001$. Таким образом, из трех рассчитанных моделей регрессии, самой оптимальной оказалась степенная модель.

На диаграмме рассеяния температуры и скорости спокойного солнечного ветра (рис. 1) видно, что зависимость между исследуемыми параметрами разная в областях больших и малых значений скорости. В облаке точек также выделялось некоторое количество групп точек, оказавшихся сверху или снизу основного тела, — остатки не доочищенных областей модуляции. Проверались соседние (по времени) с этими точками наблюдения и проводилось, в случае необходимости, дополнительное удаление наблюдений — обрезание групп точек сверху и снизу основного облака. Степенная модель рассчитывалась отдельно для двух областей значений скорости — низкоскоростного и высокоскоростного солнечного ветра. Вычисления проводились методом наименьших квадратов для зависимости $\lg T = a + b \lg V$ (возможно, в данном случае лучше применять геометрический метод наименьших квадратов, и авторы планируют в дальнейшем сравнить результаты расчетов). Точка перелома (граница между областями), менялась с шагом $\Delta V = 5$ км/с; наилучшая корреляция наблюдаемых и рассчитанных значений температуры была получена для граничной скорости $V_{bp} = 425$ км/с. Для низкоскоростного солнечного ветра ($V < 425$ км/с) коэффициент

корреляции наблюдаемой T_{obs} и рассчитанной T_{exp} температур $r_L = 0.589$, количество наблюдений $N_L = 42956$ ч; для высокоскоростного солнечного ветра ($V \geq 425$ км/с) коэффициент корреляции $r_H = 0.617$, количество наблюдений $N_H = 31412$ ч; для сводной степенной модели коэффициент корреляции $r_{L+H} = 0.798$, количество наблюдений $N_{L+H} = 74368$ ч. Проверка с помощью z -статистики показала, что коэффициент корреляции для сводной модели значимо больше, чем для степенной модели без излома ($z = 3.14$, $p = 0.0017$). Таким образом, степенная модель с точкой перелома $V_{bp} = 425$ км/с лучше описывает $T-V$ зависимость для невозмущенного солнечного ветра, чем единая степенная модель для всего интервала скоростей. В более ранних исследованиях (табл. 3) отмечалось наличие точки перелома при значениях скорости около 500 км/с или 450 км/с, но характер зависимости (линейная или квадратичная) отличался от установленного в данной работе. Используя большой количественный материал и достаточно точные методы расчета, мы установили, что $T-V$ зависимость лучше всего согласуется со степенной зависимостью с точкой перелома $V_{bp} = 425$ км/с и более быстрым ростом протонной температуры в области низких скоростей (показатель степени $\gamma = 3.37 \pm 0.02$), чем в области высоких скоростей ($\gamma = 2.21 \pm 0.02$). Качественно эти результаты совпадают с некоторыми результатами из предыдущих исследований (температура растет быстрее в области низких скоростей [Lopez, 1987; Richardson and Cane, 1995a; Watari, 2018], зависимость в области высоких скоростей

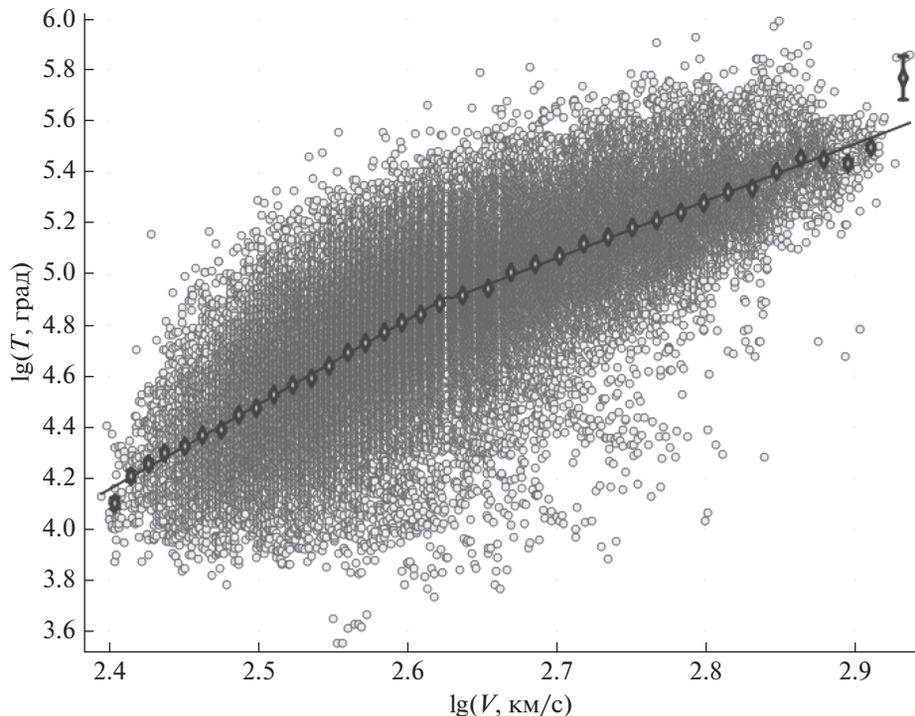


Рис. 1. Диаграмма рассеяния протонной температуры T и скорости V невозмущенного солнечного ветра ($N = 74368$); линии регрессии для низкоскоростного ($V < 425$ км/с) и высокоскоростного ($V \geq 425$ км/с) солнечного ветра.

близка к квадратичной [Neugebauer et al., 2003]), но полученные результаты дают более точно количественные оценки.

С использованием моделей, представленных в табл. 4, для исходного массива данных по значениям скорости солнечного ветра V были рассчитаны почасовые значения ожидаемой температуры T_{exp} и температурного индекса $K_T = T_{\text{obs}}/T_{\text{exp}}$. На рисунке 2 представлена гистограмма почасовых значений температурного индекса для массива данных с 1965 по 2018 г. (количество наблюдений $N_{\text{sum}} = 332153$ ч). Из рисунка видно, что распределение имеет положительную асимметрию, что подтверждается также сравнением среднего и медианного значений индекса: $K_{T\text{mean}} = 1.19 > K_{T\text{med}} = 1.05$. В области значений $0.5 < K_T < 2$ лежит 79.8% всех наблюдений; значениям $K_T < 0.5$ соответствуют 9.4% наблюдений, значениям $K_T < 0.2$ —1.0% наблюдений, $K_T < 0.1$ —0.15% наблюдений. Распределение характеризуется также наличием длинного “хвоста” в области больших значений: $K_T > 2$ —10.8% наблюдений; $K_T > 3$ —2.2% наблюдений; $K_T > 4$ —0.4% наблюдений; $K_T > 5$ —0.003% наблюдений (939 ч); $K_T > 10$ —41 ч. Максимальное значение температурного индекса $K_{T\text{max}} = 29$. Можно предполагать, что часы с самыми низкими значениями температурного индекса соответствуют ICMEs, часы с наиболее высокими

значениями — областям взаимодействия разноскоростных потоков солнечного ветра.

Анализ полученного распределения, а также значений температурного индекса для Форбуш-понижений (ФП), вызванных корональными выбросами массы или высокоскоростными потоками из корональных дыр позволил установить соответствие между значениями индекса и типом событий, модулирующих космические лучи.

Примеры ФП, причиной которых был выброс солнечного вещества (14 декабря 2006 г.) или высокоскоростной поток из корональной дыры (28 февраля 2013 г.) представлены, соответственно, на рис. 3 и 4. На верхней панели рис. 3 и 4 показаны вариации плотности (A_0 , левая шкала) и экваториальной составляющей анизотропии (A_{xy} , правая шкала) космических лучей. На второй сверху панели — температурный индекс (K_T , левая шкала) и параметр бета (правая шкала). На графике зависимости температурного индекса от времени “гребенка” обозначает области, где значения индекса $K_T < 0.5$. На третьей сверху панели представлены плотность межпланетного вещества (левая шкала) и протонная температура (правая шкала). На нижней панели — индукция ММП и ее составляющие (левая шкала) и скорость солнечного ветра (правая шкала). Вертикальной чертой обозначено начало ФП.

Таблица 3. Модели зависимости протонной температуры от скорости для невозмущенного солнечного ветра

Источник	Данные	Условия	Зависимость
Lopez, 1987	1966–1980	$V < 500$ км/с $V \geq 500$ км/с	$T_{\text{exp}} = 26000 + 316.2V + 0.961V^2$ $T_{\text{exp}} = -142000 + 510V$
Richardson & Cane, 1995	1965–1990	$V < 500$ км/с $V \geq 500$ км/с	$T_{\text{exp}} = 26000 + 316.2V + 0.961V^2$ $T_{\text{exp}} = -142000 + 510V$
Neugebauer et al., 2003	2001	$V < 450$ км/с $V \geq 450$ км/с	$T_{\text{exp}} = -127800 + 595.2V - 0.1623V^2$ $T_{\text{exp}} = -324400 + 1217V - 0.5214V^2$
Elliot et al., 2005	1998–2003	Сжатие Разрежение	$T_{\text{exp}} = -156000 + 640V$ $T_{\text{exp}} = -118000 + 459V$
Elliot et al., 2012	1974–2004	1.0 а.е. 2.5 а.е.	$T_{\text{exp}} = -164000 + 598.1V$ (кроме больших корональных дыр, например, 2003 г.) Единая линейная зависимость не подходит
Elliot et al., 2016	1965–2015	Ежегодно: 1972–2010 2010–2015	Линейная зависимость: Наклон со временем падает Наклон со временем растет
Watari, 2018	1997–2004 2009–2016	$V < 500$ км/с $V \geq 500$ км/с	Линейная зависимость; наклон более крутой Линейная зависимость; наклон более пологий
Данная статья	1965–2018	$V < 450$ км/с $V \geq 450$ км/с	Степенная зависимость: $\gamma = 3.37 \pm 0.02$ Степенная зависимость: $\gamma = 2.21 \pm 0.02$

Таблица 4. Степенные модели зависимости протонной температуры от скорости для низкоскоростного и высокоскоростного невозмущенного солнечного ветра

Скорость солнечного ветра (км/с)	Модель	Количество наблюдений	Коэффициенты регрессии		Коэффициент корреляции
			a	b	
$V < 425$	$\lg T = a + b \lg V$	42956	-3.938 ± 0.001	3.37 ± 0.02	0.589 ± 0.003
$V \geq 425$	$\lg T = a + b \lg V$	31412	-0.889 ± 0.001	2.21 ± 0.02	0.617 ± 0.004

В примере на рис. 3 представлено начавшееся 14 декабря 2006 г. большое ФП с максимальной вариацией плотности космических лучей $A_0 = 11\%$ и максимальной величиной экваториальной анизотропии $A_{xy \text{ max}} = 4\%$. Это ФП связано с выбросом солнечного вещества: заштрихованный прямоугольник на двух верхних панелях показывает магнитное облако по данным [Richardson and Cane, 2010; (<http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.htm>)]. Начало этого ФП совпадает с прибытием межпланетной ударной волны (SC – *Storm Sudden Commencement*), которая предшествует области взаимодействия разнородных потоков солнечного ветра. В этой области увеличиваются плотность межпланетного вещества и напряженность ММП, а также протонная температура и скорость солнечного ветра. За областью взаимодействия следует основная часть выброса, в которой наблюдается низкая

температура, повышенная скорость и усиленное магнитное поле. Выделенное по данным [Richardson and Cane, 2010] магнитное облако подтверждается низкими значениями температурного индекса ($K_T < 0.5$) внутри облака и повышенными значениями при входе ($1 < K_T < 3$) и выходе ($1 < K_T < 2$) из облака.

На рисунке 3 представлено также начавшееся с прибытия ударной волны (16 декабря 2006 г. в 17:55 UT) слабое ФП с весьма скромными значениями вариации плотности космических лучей ($A_0 = 1\%$) и экваториальной анизотропии ($A_{xy \text{ max}} = 0.9\%$), но заметными изменениями направления вектора анизотропии. Этому событию соответствуют высокие значения температурного индекса $K_T \approx 2$ в основной фазе ФП (область взаимодействия на входе в магнитное облако) и низкие значения $K_T < 0.5$ в фазе восстановления

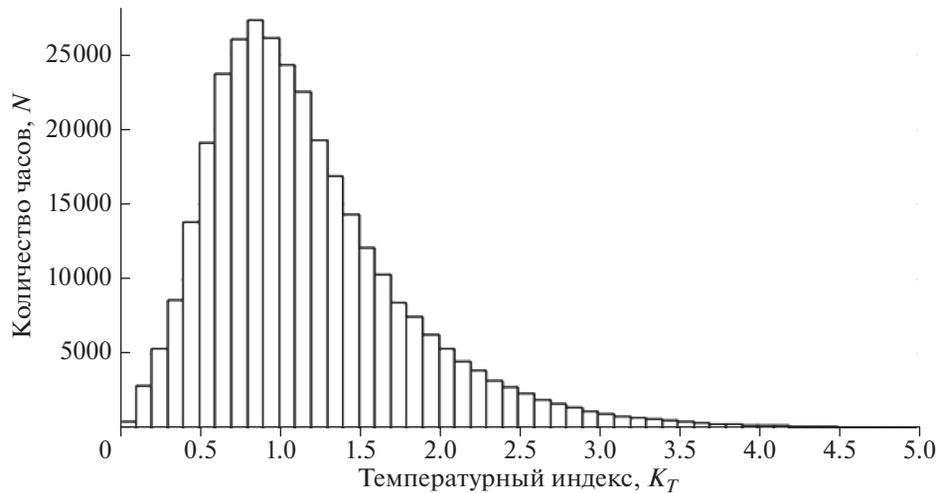


Рис. 2. Гистограмма почасовых значений температурного индекса K_T ($N_{\text{sum}} = 332153$).

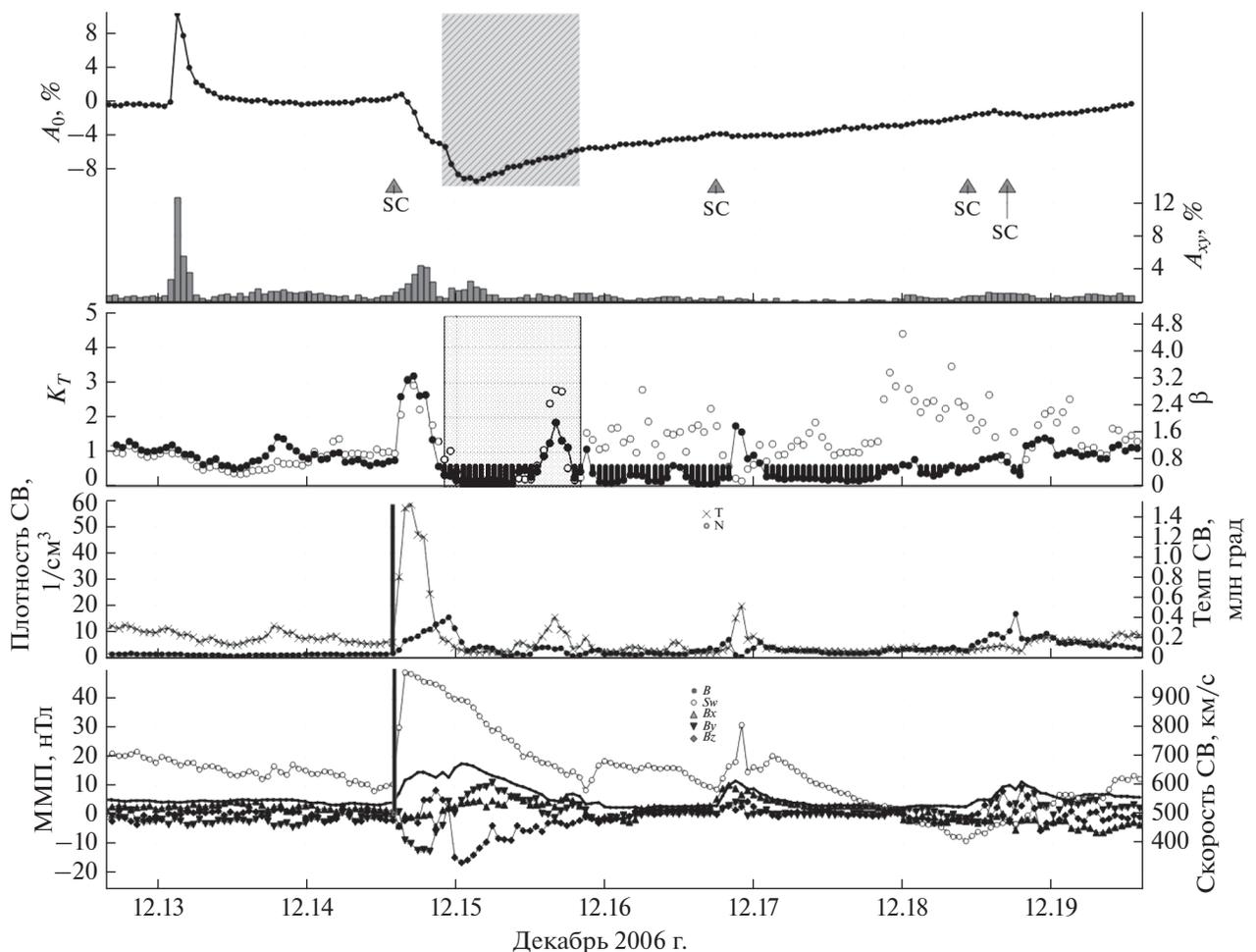


Рис. 3. Пример Форбуш-понижения, причиной которого был выброс солнечного вещества (14 декабря 2006 г.). Примечание: A_0 – вариация плотности космических лучей; A_{xy} – вариация экваториальной составляющей анизотропии космических лучей; K_T – температурный индекс; бета – отношение давления плазмы к давлению магнитного поля; N – плотность солнечного ветра; T – температура солнечного ветра; Sw – скорость солнечного ветра; B – индукция ММП; B_x, B_y, B_z – индукция составляющих ММП; SC – прибытие межпланетной ударной волны; заштрихованный прямоугольник – магнитное облако по данным [Richardson and Cane, 2010].

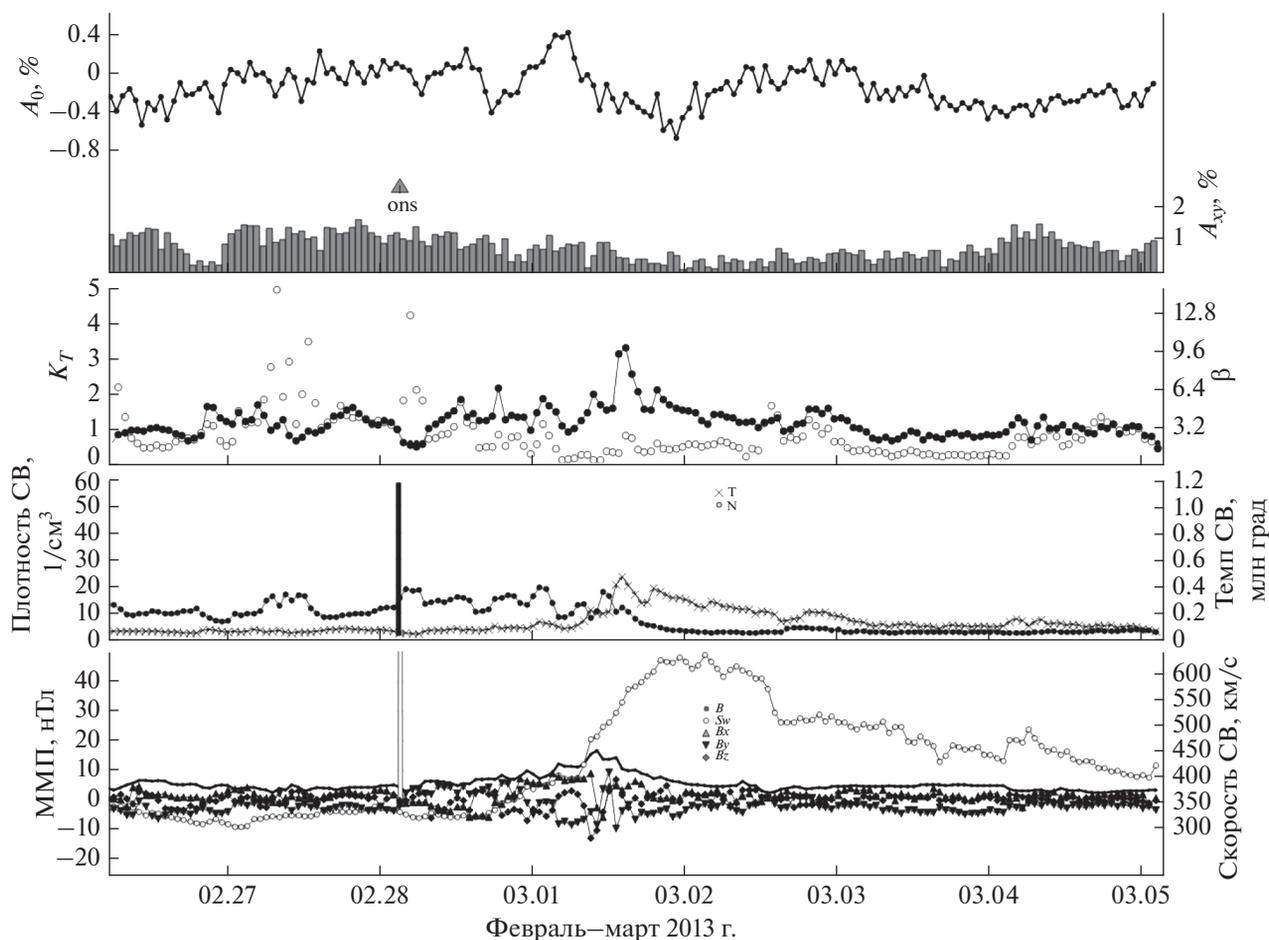


Рис. 4. Пример Форбуш-понижения, причиной которого был высокоскоростной поток из корональной дыры (28 февраля 2013). Примечание: A_0 – вариация плотности космических лучей; A_{xy} – вариация экваториальной составляющей анизотропии космических лучей; K_T – температурный индекс; бета – отношение давления плазмы к давлению магнитного поля; N – плотность солнечного ветра; T – температура солнечного ветра; Sw – скорость солнечного ветра; B – индукция ММП; B_x, B_y, B_z – индукция составляющих ММП; ons – начало ФП.

(внутри магнитного облака). Таким образом, поведение температурного индекса позволяет предположить, что это ФП также связано с магнитным облаком, но его влияние намного меньше, чем в предыдущем событии. Это, по-видимому, обусловлено очень слабым магнитным полем в магнитном облаке и невысокой скоростью солнечного ветра. Из рисунка 3 (нижняя панель) видно, что значениям $K_T \approx 2$, то есть области взаимодействия, соответствуют повышенные значения скорости солнечного ветра (≈ 800 км/с) и магнитной индукции (≈ 10 нТл), в то время как пониженным значениям температурного индекса $K_T < 0.5$ соответствует постепенное уменьшение этих параметров. Регулярность в поведении ММП и постепенное понижение скорости солнечного ветра подтверждает предположение о прохождении магнитного облака.

В примере на рис. 4 представлено начавшееся 28 февраля 2013 г. ФП с максимальной вариацией

плотности космических лучей $A_0 = 1.5\%$ и максимальным значением экваториальной анизотропии $A_{xy \max} = 1.4\%$. Это ФП вызвано высокоскоростным потоком из корональной дыры, прошедшей центральный солнечный меридиан с 26 февраля (http://www.solen.info/solar/coronal_holes.html). Хотя в этом случае ударная волна отсутствует, Земля также сначала входит в область взаимодействия высокоскоростного и фонового потоков солнечного ветра. В этой области плотность межпланетного вещества и напряженность ММП имеют повышенные значения, причем магнитное поле достаточно сильно меняется по направлению и величине. Затем Земля входит в основную часть высокоскоростного потока, и этот вход выделяется возрастанием скорости и протонной температуры и падением плотности солнечного ветра и напряженности ММП. Основная часть высокоскоростного потока из корональной дыры характеризуется повышенной скоростью и тем-

пературой, низкой плотностью межпланетного вещества и слабым ММП. Температурный индекс во время этого события характеризуется значениями $1 < K_T < 2$ и нигде не опускается ниже 0.8. Такое поведение характеристик солнечного ветра и вариаций космических лучей достаточно типично для событий, связанных с высокоскоростными потоками из корональных дыр [например, Мелкумян и др., 2018].

Кроме приведенных выше примеров, мы рассмотрели множество разных событий и убедились, что низкие значения температурного индекса $K_T < 0.5$ являются надежным признаком прихода к Земле ICMEs. Обычно достаточно длительные интервалы низких значений $K_T < 0.5$ позволяют выделять внутренние области ICME и, предположительно, магнитные облака. Интересно, что температурный индекс позволяет выделять даже слабые ICMEs, не идентифицируемые в других параметрах. Интервалы аномально высоких значений $K_T > 2$ характеризуют области взаимодействия разноскоростных потоков солнечного ветра. Если в межпланетном возмущении имеется магнитное облако, то температурный индекс уменьшается при входе в облако и увеличивается при выходе из него, хотя не во всех случаях его значение $K_T < 0.5$. Часто в магнитном облаке значение температурного индекса падает до величин $K_T < 0.2$, иногда — до $K_T < 0.1$. С другой стороны, значения температурного индекса $K_T > 1$ являются верным признаком отсутствия ICMEs; обычно такие события обусловлены корональными дырами. Внутри высокоскоростных потоков из корональных дыр температурный индекс принимает обычно значения $1 < K_T < 3$. Если внутри дыры температурный индекс маленький — это признак смешанного события, то есть наличия в высокоскоростном потоке из корональной дыры влияния волоконных выбросов.

В таблице 5 представлены результаты статистической обработки значений температурного индекса K_T для двух выборок (с мая 1996 по июль 2016 г.) из базы данных FEID: а) ФП, связанные с магнитными облаками (117 событий); б) ФП, вызванные высокоскоростными потоками из корональных дыр (386 событий). Данные о магнитных облаках взяты из базы (<http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.htm>); данные о корональных дырах — из базы (http://www.solen.info/solar/coronal_holes.html). В таблице 5 представлены: среднее, медиана, минимум и максимум минимального за время ФП значения температурного индекса (K_{Tmin}) для ФП, связанных с магнитными облаками (группа MC) и корональными дырами (группа CH). Из таблицы 5 видно, что среднее, медиана, минимум и максимум значений K_{Tmin} в группе MC значительно меньше соответствующих величин в группе CH. Для событий

Таблица 5. Количество событий (N), среднее (mean), медиана (med), минимум (min) и максимум (max) минимального за время события значения температурного индекса (K_{Tmin}) для ФП, связанных с магнитными облаками (группа MC) и корональными дырами (группа CH)

ФП	N	Mean	Med	Min	Max
Группа MC	117	0.189 ± 0.012	0.16	0.06	0.47
Группа CH	386	0.602 ± 0.010	0.58	0.28	2.10

из группы MC все значения $K_{Tmin} < 0.5$, при этом в области значений $K_{Tmin} < 0.3$ находятся 83% событий этой группы. Более подробно: $K_{Tmin} < 0.1$ — 31% событий; $0.1 \leq K_{Tmin} < 0.2$ — 31% событий; $0.2 \leq K_{Tmin} < 0.3$ — 21% событий; $0.3 \leq K_{Tmin} < 0.4$ — 12% событий; $0.4 \leq K_{Tmin} < 0.5$ — 5% событий.

4. ВЫВОДЫ

На большом экспериментальном материале получена связь протонной температуры T и скорости V солнечного ветра в спокойных условиях. Оказалось, что зависимость температуры от скорости для спокойного солнечного ветра хорошо описывает степенная модель с показателем степени $\gamma = 3.37 \pm 0.02$ в области низких скоростей ($V < 425$ км/с) и $\gamma = 2.21 \pm 0.02$ в области высоких скоростей ($V \geq 425$ км/с). На основе полученной зависимости, для каждого часа с 1965 по 2018 г., для которого есть данные о параметрах солнечного ветра, вычислены ожидаемая протонная температура T_{exp} и температурный индекс $K_T = T_{obs}/T_{exp}$. Этот индекс аномально велик в областях взаимодействия разноскоростных потоков солнечного ветра и аномально мал внутри магнитных облаков, что позволяет использовать его при выделении связанных с этими неоднородностями Форбуш-понижений и для идентификации их солнечных источников. Часто именно этот индекс позволяет достаточно надежно идентифицировать солнечный источник Форбуш-понижения.

4. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны коллективам мировой сети станций космических лучей, обеспечивающим данные непрерывной регистрации нейтронной компоненты: (http://cr0.izmiran.ru/ThankYou/Our_Acknowledgment.pdf); благодарим базу данных NMDB (www.nmdb.eu). Работа базируется на экспериментальных данных УНУ “Российская национальная сеть станций космических лучей” (Сеть СКЛ).

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при частичной поддержке Программы фундаментальных исследований президиума РАН № 12.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абунина М.А., Абунин А.А., Белов А.В., Ерошенко Е.А., Оленева В.А., Янке В.Г. Долгопериодные изменения амплитудно-фазовой взаимозависимости первой гармоники анизотропии космических лучей // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 53. № 5. С. 601–610. 2013.
- Белов А.В., Ерошенко Е.А., Янке Г.В., Оленева В.А., Абунина М.А., Абунин А.А. Метод глобальной съемки для мировой сети нейтронных мониторов // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 58. № 3. С. 356–372. 2018.
- Мелкумян А.А., Белов А.В., Абунина М.А., Абунин А.А., Ерошенко Е.А., Оленева В.А., Янке В.Г. Основные свойства Форбуш-эффектов, связанных с высокоскоростными потоками из корональных дыр // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 58. № 6. С. 163–176. 2018.
- Asipenka A.S., Belov A.V., Eroshenko E.A., Klepach E.G., Yanke V.G. Interactive database on the cosmic rays anisotropy // Adv. Space Res. V. 43. № 4. P. 708–716. 2009.
- Belov A.V., Eroshenko E.A., Yanke V.G. Global and local indices of cosmic ray activity / Proc. 26th ICRC. Salt Lake City, USA, 1999. V. 6. P. 472–475. 1999.
- Belov A.V. Forbush effects and their connection with solar, interplanetary and geomagnetic phenomena / Proc. IAU Symposium. № 257. P. 119–130. 2009.
- Cranmer S.R. Coronal holes // Living Rev. Sol. Phys. V. 6. № 1. ID. 3. 2009.
<https://doi.org/10.12942/lrsp-2009-3>
- Elliott H.A., McComas D.J., Schwadron N.A., Gosling J.T., Skoug R.M., Gloeckler G., Zurbuchen T.H. An improved expected temperature formula for identifying interplanetary coronal mass ejections // J. Geophys. Res. V. 110. № A4. 2005.
<https://doi.org/10.1029/2004JA010794>
- Elliott H.A., Henney C.J., McComas D.J., Smith C.W., Vasquez B.J. Temporal and radial variation of the solar wind temperature-speed relationship // J. Geophys. Res. Space. V. 117. A09102. 2012.
<https://doi.org/10.1029/2011JA017125>
- Elliott H. A., McComas D.J., DeForest C.E. Long-term trends in the solar wind proton measurements // Astrophys. J. V. 832. № 1. ID. 66. 10 p. 2016.
- Gosling J.T., Pizzo V., Bame S.J. Anomalously low proton temperatures in the solar wind following interplanetary shock waves – Evidence for magnetic bottles? // J. Geophys. Res. V. 78. № 13. P. 2001–2009. 1973.
- Hundhausen A.J. An interplanetary view of coronal holes / Coronal holes and high speed wind streams. Ed. Zirker J.B. Colorado Associated University Press, Boulder. P. 225–329. 1977.
- Lopez R.E., Freeman J.W. The solar wind proton temperature-velocity relationship // J. Geophys. Res. V. 91. P. 1701–1705. 1986.
- Lopez R.E. Solar cycle invariance in solar wind proton temperature relationships // J. Geophys. Res. V. 92. P. 11189–11194. 1987.
- Melkumyan A.A., Belov A.V., Abunina M.A., Abunin A.A., Eroshenko E.A., Yanke V.G., Oleneva V.A. Comparison between statistical properties of Forbush decreases caused by solar wind disturbances from coronal mass ejections and coronal holes // Adv. Space Res. V. 63. № 2. P. 1100–1109. 2019.
- Neugebauer M., Snyder C.W. Mariner 2 Observations of the solar wind: 1. Average properties // J. Geophys. Res. V. 71. P. 4469–4484. 1966.
- Neugebauer M., Steinberg J.T., Tokar R.L., Barraclough B.L., Dors E.E., Wiens R.C., Gingerich D.E., Luckey D., Whiteaker D.B. Genesis on-board determination of the solar wind flow regime // Space Sci. Rev. V. 105. P. 661–679. 2003.
<https://doi.org/10.1023/A:1024478129261>
- Richardson I.G., Cane H.V. Regions of abnormally low proton temperature in the solar wind (1965–1991) and their association with ejecta // J. Geophys. Res. V. 100. № A12. P. 23397–23412. 1995a.
- Richardson I.G., Cane H.V. Regions of abnormally low proton temperature as signatures of ejecta in the solar wind and their solar cycle dependence / 24th ICRC. Rome, Italy, 1995. V. 4. P. 868–871. 1995b.
- Richardson I.G., Cane H.V. Near-Earth interplanetary coronal mass ejections during solar cycle 23 (1996–2009): Catalog and summary of properties // Solar Phys. V. 264. № 1. P. 189–237. 2010.
- Watari S. Intense geomagnetic storms associated with coronal holes under the weak solar-wind conditions of cycle 24 // Solar Phys. V. 293. № 2. ID. 23. 12 p. 2018.
– <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html>
– http://www.solen.info/solar/coronal_holes.html
– <http://spaceweather.izmiran.ru/eng/dbs.html>
– <http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/ic-metab2.htm>