СВЯЗЬ СКОРОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА И МЕЖПЛАНЕТНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ, МОДУЛИРУЮЩИЕ КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ

**Мелкумян А.А.¹, Белов А.В.², Абунина М.А.²,
Абунин А.А.², Ерошенко Е.А.², Янке В.Г.²**

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

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

SOLAR WIND TEMPERATURE-VELOCITY RELATIONSHIP AND INTERPLANETARY DISTURBANCES MODULATING OF COSMIC RAYS

**Melkumyan A.A.¹, Belov A.V.², Abunina M.A.²,
Abunin A.A.², Eroshenko E.A.², Yanke V.G.²**

¹*Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University),
Moscow, Russia*

²*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation Russian Academy of Sciences, IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia*

In this work we analyzed the behavior of the proton temperature and the solar wind speed based on a large amount of experimental material. It was found that the dependence of temperature on speed for a calm solar wind has a power-law character, and in the region of low solar wind velocities, the regression coefficient is greater than in the region of high ones. Based on the obtained dependence, for each hour for which there is data on the parameters of the solar wind, from July 1965 to December 2018, the expected proton temperature and the temperature index K_T (the ratio of the observed and expected temperatures) were calculated. This index turned out to be anomalously large in the interaction regions of different-speed solar wind fluxes and anomalously small inside magnetic clouds, which makes it possible to use it to isolate Forbush depressions associated with these interplanetary structures and identify their solar sources.

DOI: 10.31725/0552-5829-2020-201-204

Введение

Форбуш-понижения (ФП) космических лучей (КЛ) обусловлены двумя типами солнечных источников: корональными дырами (КД) и корональными выбросами массы (КВМ). В некоторых случаях идентификация солнечного источника с межпланетным возмущением, вызывающим Форбуш-понижение, затруднена и требует тщательного и детального анализа характеристик солнечного ветра.

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 [6, 8]. Показано, что в распространяющихся в межпланетном пространстве выбросах солнечного вещества протонная температура ниже ожидаемого значения и не коррелирует со скоростью [2, 5, 9, 10]. Наличие большого экспериментального материала, накопленного за годы спутниковых измерений, позволяет исследовать временные и пространственные вариации T – V зависимости [3, 4, 7, 11].

В данной работе сопоставление поведения протонной температуры и скорости солнечного ветра (СВ) проводилось на основе большого экспериментального материала, объединенного в базы данных ИЗМИРАН.

Цель настоящей работы – на большом количественном материале 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 – сконструировать связанный с температурой числовой индекс, который поможет идентифицировать тип межпланетных возмущений, модулирующих КЛ.

В данной работе приводятся только основные результаты, а более подробное изложение можно найти в [1].

Данные и методы

В данной работе использовались часовые значения параметров межпланетной среды (V_{SW} , T_{SW} , B_{IMF} , β), взятые из базы OMNI [12]. Мы ограничились временным интервалом с 1 июля 1965 г. по 31 декабря 2018 г., исключив часы, в которых не было измерений параметров солнечного ветра, и получили $N_{sum} = 332153$ ч для исследования.

Обработка данных включала несколько последовательных этапов: 1) Выделение спокойного СВ; 2) Построение регрессионных моделей зависимости протонной температуры T от скорости V для невозмущенного СВ; 3) Вычисление ожидаемых значений протонной температуры T_{exp} по наблюдаемым значениям скорости V для всего массива данных; 4) Вычисление почасовых значений температурного индекса $K_T = T_{obs}/T_{exp}$ для всего массива данных; 5) Анализ полученных значений температурного индекса для ФП, вызванных корональными выбросами массы или высокоскоростными потоками из корональных дыр.

Результаты и их обсуждение

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. Для выделения спокойного СВ использовались следующие параметры: напряженность ММП $B < 7$ нТл; $|B_z| < 3.5$ нТл; отклонение силовой линии ММП $B_x B_y < 0$; скорость СВ $V < 900$ км/с; модуль почасового изменения скорости СВ $|\Delta V| < 35$ км/с; параметр бета (отношение давления плазмы к давлению магнитного поля) $\beta > 0.1$. По указанным параметрам получилось выделить $N = 74368$ ч или 22.4% от всех наблюдений (рис. 1).

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.

Рис. 2. Гистограмма почасовых значений температурного индекса K_T .

Степенные модели зависимости протонной температуры от скорости для низкоскоростного и высокоскоростного невозмущенного солнечного ветра приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Скорость СВ (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

С использованием модели, представленной в таблице 1, для исходного массива данных по значениям скорости солнечного ветра V были рассчитаны почасовые значения ожидаемой температуры T_{exp} и температурного индекса $K_T = T_{obs}/T_{exp}$, где T_{obs} – наблюдаемая температура.

Типы солнечных источников

Можно предположить, что часы с самыми низкими значениями температурного индекса соответствуют КВМ, часы с наиболее высокими значениями – областям взаимодействия разноскоростных потоков солнечного ветра. В таблице 2 представлены результаты статистической обработки значений температурного индекса для двух выборок Форбуш-понижений (с мая 1996 по июль 2016 г.) из базы данных FEID, созданной в ИЗМИРАН [13]: Группа МО: ФП, связанные с магнитными облаками (МО) (117 событий); Группа КД: ФП, вызванные высокоскоростными потоками из корональных дыр (386 событий). Данные о магнитных облаках взяты из списка [14]; данные о корональных дырах – из списка [15]. В таблице 2 представ-

лены значения температурного индекса (K_T) для ФП, связанных с магнитными облаками (группа МО) и потоками из корональных дыр (группа КД).

Таблица 2.

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

Выводы

Получена связь протонной температуры (T) и скорости (V) солнечного ветра в спокойных условиях на большом экспериментальном материале.

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).

Вычислены ожидаемая протонная температура T_{exp} и температурный индекс $K_T = T_{obs}/T_{exp}$ для каждого часа с 1965 по 2018 гг., для которых есть данные о параметрах солнечного ветра.

Этот индекс, как правило, аномально велик в областях взаимодействия разноскоростных потоков солнечного ветра и аномально мал внутри магнитных облаков. Полученный индекс применим для идентификации солнечных источников Форбуш-понижений.

Финансирование. А.В. Белов, М.А. Абунина, А.А. Абунин поддержаны Грантом РФФИ № 20-72-10023.

Литература

1. Мелкумян А.А., Белов А.В., Абунина М.А. и др. // ГиА. 2020. Т. 60. № 5. С. 547-556.
2. Elliott H.A., McComas D.J., DeForest C.E. // *Astrophys. J.* 2016. V. 832. № 1. ID. 66. 10 p.
3. Elliott H.A., Henney C.J., McComas D.J., et al. // *J. Geophys. Res. Space.* 2012. V. 117. A09102. <https://doi.org/10.1029/2011JA017125>
4. Elliott H.A., McComas D.J., Schwadron N.A., et al. // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. № A4. <https://doi.org/10.1029/2004JA010794>
5. Gosling J.T., Pizzo V., Bame S.J. // *J. Geophys. Res.* 1973. V. 78. № 13. P. 2001–2009.
6. Lopez R.E. // *J. Geophys. Res.* 1987. V. 92. P. 11189–11194.
7. Lopez R.E., Freeman J.W. // *J. Geophys. Res.* 1986. V. 91. P. 1701–1705.
8. Neugebauer M., Snyder C.W. // *J. Geophys. Res.* 1966. V. 71. P. 4469–4484.
9. Neugebauer M., Steinberg J.T., Tokar R.L., et al. // *Space Sci. Rev.* 2003. V. 105. P. 661–679. <https://doi.org/10.1023/A:1024478129261>
10. Richardson I.G., Cane H.V. // *J. Geophys. Res.* 1995. V. 100. № A12. P. 23397–23412.
11. Watari S. // *Solar Phys.* 2018. V. 293. № 2. ID. 23. 12 p.
12. <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html>
13. <http://spaceweather.izmiran.ru/rus/dbs.html>
14. <http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.htm>
15. http://www.solen.info/solar/coronal_holes.html