

СТРУКТУРА КОРОНАЛЬНОГО ВЫБРОСА МАССЫ В МЕЖПЛАНЕТНОМ ПРОСТРАНСТВЕ: АНАЛИЗ ДАННЫХ IMAGE/EUV

А.В. Рубцов¹, С.А. Анфиногентов^{1,2}

¹Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия,
avrubtsov@iszf.irk.ru

²Институт космических исследований Российской академии наук, Москва, Россия

SPATIAL STRUCTURE OF THE INTERPLANETARY CORONAL MASS EJECTION: IMAGE/EUV DATA ANALYSIS

A.V. Rubtsov¹, S.A. Anfinogentov^{1,2}

¹Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, avrubtsov@iszf.irk.ru

²Space Research Institute RAS, Moscow, Russia

Аннотация. В работе представлено уникальное наблюдение фронтов повышенной яркости на длине волны 304 Å на фоне Земли по данным спутника IMAGE. Выдвинуто предположение, что эти фронты являются отображением ударной волны коронального выброса массы, произошедшего на Солнце несколькими днями ранее. Факт прохождения выброса также подтверждается данными спутников ACE и Wind вблизи точки L1. Анализ данных спутника IMAGE показал, что настоящий случай является единственным примером подобных наблюдений на длине волны 304 Å в период 2000–2005 гг. и оставляет открытым вопрос о причинах этого необычного явления.

Ключевые слова: корональный выброс массы, ударная волна, солнечный ветер, IMAGE.

Abstract. In this study we present a unique observation of fronts of increased brightness at a wavelength of 304 Å at the background of the Earth, according to data from the IMAGE satellite. We suggested that these fronts are a projection of the shock front of a coronal mass ejection that occurred on the Sun a few days earlier. The fact that the ejection passed is also confirmed by data from the ACE and Wind satellites near L1 point. Analysis of IMAGE satellite data showed that the present case is the only example of such observations at a wavelength of 304 Å from the period 2000–2005 and left the question of the reasons for this unusual phenomenon open.

Keywords: coronal mass ejection, shock front, solar wind, IMAGE

ВВЕДЕНИЕ

Исследования околоземного космического пространства, в частности магнитосферы и плазмосферы, давно представляют большой интерес и для их осуществления были запущены десятки космических аппаратов. Однако практически все они измеряли параметры плазмы и электромагнитного поля *in situ*, что накладывает ограничение на понимание глобальной картины происходящих процессов. Поэтому особое место в истории космических исследований занимает миссия Imager for Magnetopause-to-Aurora Global Exploration (IMAGE) [Burch, 2000], которая, среди прочего, была оборудована камерой для наблюдения за околоземным пространством в крайнем ультрафиолетовом диапазоне.

Инструмент Extreme Ultraviolet Imager (EUV) [Sandel et al., 2000] представлял собой набор из трёх широкоугольных камер, настроенных на резонансную линию He⁺ на длине волны 304 Å. Три поля зрения камер частично пересекаются, формируя постоянную область обзора размером 84°×30°. Каждый пиксель полученного изображения охватывает область размером 0,6°×0,6°. Излучение на длине волны 304 Å из плазмосферы является оптически тонким, поэтому измеренная яркость прямо пропорциональна плотности He⁺ в столбе вдоль луча зрения. Каждое изображение IMAGE/EUV охватывает всю плазмосферу одним кадром. Таким образом, IMAGE/EUV получал изображения пространственного распределения He⁺ в плазмосфере с пространственным разрешением не меньше 0,1 R_E и временным разрешением 10 минут.

Миссия IMAGE работала с марта 2000 г. по декабрь

2005 г. Она сразу приковала к себе внимание исследователей [Sandel et al., 2001], привнесла неоценимый вклад в развитие представлений о структуре и динамике плазмосферы [Goldstein, 2006] и заложила фундамент для будущих исследований с помощью камер в ультрафиолетовом диапазоне [Goldstein et al., 2022]. Кроме изучения плазмосферы, данные IMAGE/EUV использовались для оценки фонового излучения [Goldstein et al., 2017], а в настоящей работе мы представляем уникальное наблюдение, которое, по всей видимости, представляет собой прохождение коронального выброса массы (КВМ) в межпланетном пространстве на фоне Земли.

КОРОНАЛЬНЫЙ ВЫБРОС МАССЫ НА ФОНЕ ЗЕМЛИ: ДАННЫЕ IMAGE/EUV

Анализ данных IMAGE/EUV выявил появление фронтов повышенной яркости, сопоставимой с наблюдавшейся в тот момент плазмосферой, пересекающих всё поле зрения камеры. С 12:21 до 21:12 UT 9 января 2005 г. эти фронты распространялись от Солнца и проходили на фоне Земли, никак не воздействуя на околоземную плазму. На рис. 1 приведены несколько изображений с камеры IMAGE/EUV, на которых отмечены приблизительные границы переднего фронта. Эти фронты, скорее всего, появились из-за попадания в поле зрения IMAGE/EUV облаков плазмы с повышенной концентрацией и не являются инструментальным шумом, поскольку наблюдаются в течение длительного времени последовательно всеми тремя камерами. Данное явление наблюдалось лишь единожды за всё время работы миссии.

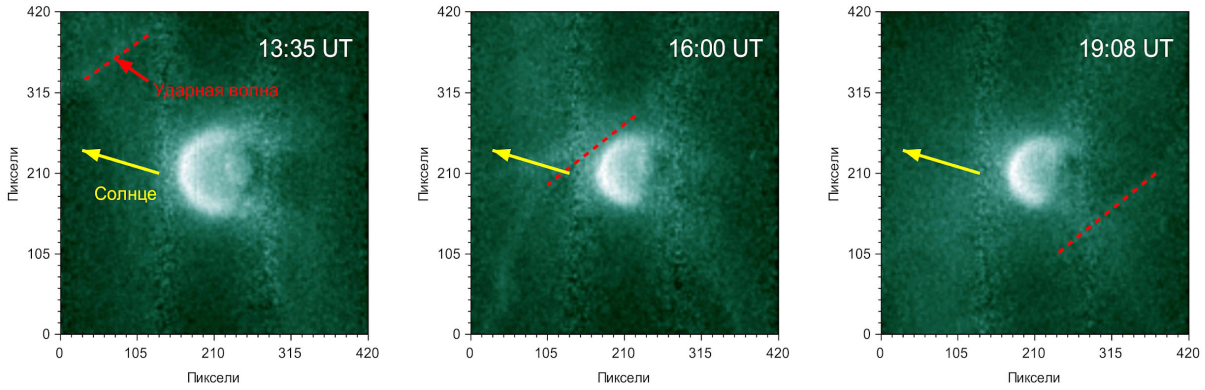


Рис. 1. Изображения камеры IMAGE/EUV в 13:35, 16:00 и 19:08 UT 09.01.2005 г. Оттенками зелёного отображается яркость после коррекции плоского поля и сжатия динамического диапазона. Красной пунктирной линией показано приблизительное расположение ударной волны КВМ. Жёлтая стрелка указывает направление на Солнце в плоскости изображения

Отсутствие взаимодействия наблюдаемых фронтов с околоземной плазмой указывает на большое расстояние между ними, а значит и об огромном пространственном масштабе наблюдаемых явлений, что естественным образом наталкивает на предположение о том, что мы видим ударную волну перед КВМ в межпланетном пространстве.

НАБЛЮДЕНИЯ SOHO, ACE И WIND

Предполагаемым источником облака плазмы, видимого IMAGE/EUV 9 января 2005 г., является КВМ, наблюдавшийся Large Angle and Spectrometric Coronagraph (LASCO) на спутнике Solar and Heliospheric Observatory (SOHO) [Domingo et al., 1995] с 15:30 до 18:30 UT 5 января около восточного лимба Солнца. Его скорость в момент выброса составила около 735 км/с, что означает прибытие плазмы к орбите Земли не раньше 00:10 UT 8 января. Учитывая поле зрения IMAGE/EUV, это единственный КВМ, который мог быть виден в рассматриваемый

промежуток времени.

Наблюдения SOHO/LASCO дополняются *in situ* измерениями параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП) вблизи точки L1 на спутниках Advanced Composition Explorer (ACE) [Stone et al., 1998] и Wind [Wilson et al., 2021] (рис. 2). Оба аппарата зафиксировали приход КВМ 9 января. Одновременно были зарегистрированы два скачка Y- и Z-компонент ММП (рис. 2б) и скорости солнечного ветра (рис. 2г) около 08:00 и 09:30 UT. Отметим, что X-компонента скорости оставалась на уровне -460 ± 10 км/с, (рис. 2в), а другие две компоненты усилились в направлении от КВМ. Признаки КВМ на спутнике Wind появились на ~10 минут раньше, чем на спутнике ACE, что также указывает на расположение фронта ударной волны. Спутник Wind зарегистрировал резкое возрастание концентрации ионов до 20 см^{-3} одновременно со вторым скачком ММП, но по данным ACE в тот же момент имело место лишь небольшое увеличение концентрации (рис. 2д).

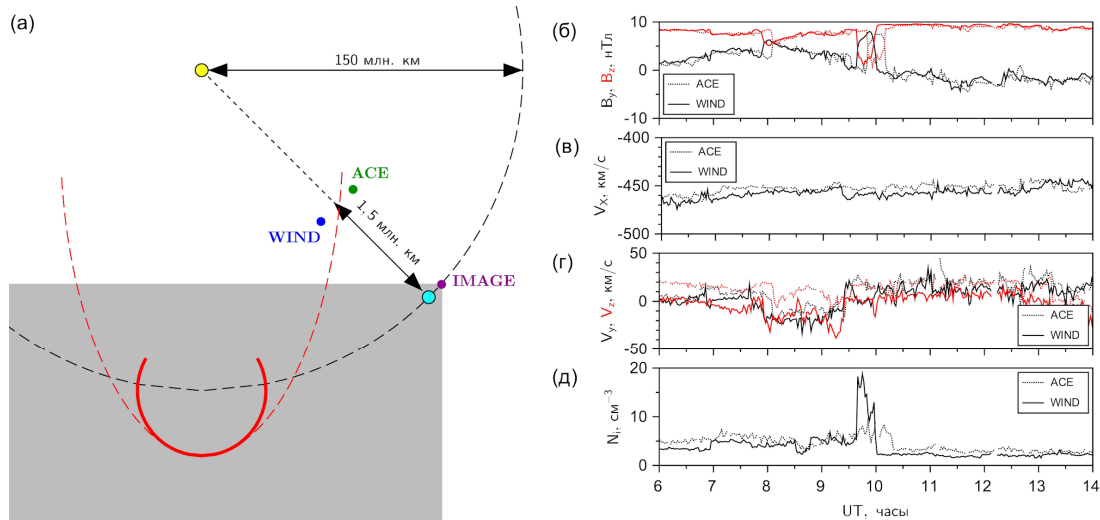


Рис. 2. Схематичное изображение взаимного расположения Солнца (жёлтый круг), Земли (голубой круг), спутников ACE (зелёный круг), Wind (синий круг) и IMAGE (фиолетовый круг), где поле зрения инструмента EUV показано серой областью, и ударной волны КВМ (красные кривые) 09.01.2005 г. (а). Параметры ММП и солнечного ветра по данным спутников ACE (пунктирная линия) и Wind (сплошная линия) в системе координат GSM: Y- (чёрная) и Z-компоненты (красная) ММП (б), X-компонента скорости солнечного ветра (в), Y- (чёрная) и Z-компоненты (красная) скорости (г) и концентрация ионов в солнечном ветре (д)

Оценка времени распространения КВМ до момента его наблюдения по данным ACE и Wind показывает, что он покинул Солнце не раньше 13:30–15:30 UT 5 января, что соответствует данным SOHO/LASCO. Следует отметить, что иных КВМ, которые могли бы вызвать наблюдаемые *in situ* возмущения, не обнаружено, а в процессе распространения КВМ в межпланетном пространстве его скорость быстро уменьшается [Möstl et al., 2014].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования с помощью многоспутниковых *in situ* измерений [Witasse et al., 2017; Möstl et al., 2022] могут быть органично дополнены наблюдениями с помощью камер, которые показывают глобальный контекст явлений [Stenborg et al., 2023]. Архивные данные IMAGE/EUV могут быть использованы для развития существующих представлений о распространении КВМ в межпланетном пространстве с помощью наблюдений в крайнем ультрафиолетовом диапазоне.

На рис. 2а представлено схематичное изображение рассматриваемого в данной работе случая. Мы предполагаем, что 9 января 2005 г. IMAGE/EUV наблюдал прохождение ударной волны КВМ на фоне Земли. Это предположение подтверждается данными по наблюдению короны Солнца от SOHO/LASCO и параметрам солнечного ветра и ММП в окрестности точки L1 от спутников ACE и Wind. Открытым пока остается вопрос о причинах уникальности этого случая.

Авторы благодарят руководителей миссии IMAGE и команду инструмента EUV за данные об излучении на длине волны 304 Å. Выражаем благодарность разработчикам миссии SOHO и инструмента LASCO за изображения короны Солнца. Мы благодарим команды инструментов MFI и SWE спутников ACE и Wind за предоставление данных о ММП и параметрах солнечного ветра, и CDAWeb NASA [<https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>] за открытый доступ к этим данным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Burch J.L. IMAGE mission overview // Space Sci. Rev. 2000. V. 91. P. 1–14. DOI: 10.1023/A:1005245323115.

Domingo V., Fleck B., Poland A.I. The SOHO mission: An overview // Sol. Phys. 1995. V. 162. P. 1–37. DOI: 10.1007/BF00733425.

Goldstein J. Plasmasphere response: Tutorial and review of recent imaging results // Space Sci. Rev. 2006. V. 124. P. 203–216. DOI: 10.1007/s11214-006-9105-y.

Goldstein J., Gell D., Sandel B.R. Empirical determination of extreme ultraviolet imager background // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2017. V. 122. P. 7414–7432. DOI: 10.1002/2017JA024301.

Goldstein J., Gallagher D.L., Sandel B.R. et al. The future of plasmaspheric extreme ultraviolet (EUV) imaging // In: Understanding the space environment through global measurements / Eds.: Colado-Vega Y., Gallagher D., Frey H., Wing S. Elsevier, 2022. P. 231–286. DOI: 10.1016/B978-0-12-820630-0.00010-6.

Möstl C., Amla K., Hall J.R. et al. Connecting speeds, directions and arrival times of 22 Coronal Mass Ejections from the Sun to 1 AU // Astrophys. J. 2014. V. 787. 119. DOI: 10.1088/0004-637X/787/2/119.

Möstl C., Weiss A.J., Reiss M.A. et al. Multipoint Interplanetary Coronal Mass Ejection observed with Solar Orbiter, BepiColombo, Parker Solar Probe, Wind, and STEREO-A // Astrophys. J. Lett. 2022. V. 924. L6. DOI: 10.3847/2041-8213/ac42d0.

Sandel B.R., Broadfoot A.L., Curtis C.C. et al. The Extreme Ultraviolet Imager investigation for the IMAGE mission // Space Sci. Rev. 2000. V. 91. P. 197–242. DOI: 10.1023/A:1005263510820.

Sandel B.R., King R.A., Forrester W.T. et al. Initial results from the IMAGE Extreme Ultraviolet Imager // Geophys. Res. Lett. 2001. V. 28. P. 1439–1442. DOI: 10.1029/2001GL012885.

Stenborg G., Paouris E., Howard R.A. et al. Investigating Coronal Holes and CMEs as sources of brightness depletion detected in PSP/WISPR images // Astrophys. J. 2023. V. 949. 61. DOI: 10.3847/1538-4357/acd2cf.

Stone E.C., Frandsen A.M., Mewaldt R.A. et al. The Advanced Composition Explorer // Space Sci. Rev. 1998. V. 86. P. 1–22. DOI: 10.1023/A:1005082526237.

Wilson III L.B., Brosius A.L., Gopalswamy N. et al. A quarter century of Wind spacecraft discoveries // Rev. Geophys. 2021. V. 59. I. 2. e2020RG000714. DOI: 10.1029/2020RG000714.

Witasse O., Sánchez-Cano B., Mays M.L. et al. Interplanetary coronal mass ejection observed at STEREO-A, Mars, comet 67P/Churyumov-Gerasimenko, Saturn, and New Horizons en route to Pluto: Comparison of its Forbush decreases at 1.4, 3.1, and 9.9 AU // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2017. V. 122. P. 7865–7890. DOI: 10.1002/2017JA023884.

URL: <https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/> (дата обращения 30.05.2024).