Секция А. Астрофизика и физика Солнца. БШФФ-2026. С. 65–69.

УДК 523.98
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-65
Orcid 0009-0008-9914-8596

АНАЛИЗ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ГЕОЭФФЕКТИВНОГО ПРОТУБЕРАНЦА В ИЮНЕ 2024 ГОДА

К.Б. Капорцева[1,2], Ю.С. Шугай[1], А.А. Вахрушева[1,2], А.О. Ширяев[1,3]

[1]Научно-исследовательский институт Ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В.Ломоносова, Москва, Россия, kb.kaportceva@physics.msu.ru
[2]Физический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова, Москва, Россия
[3]Факультет Космических Исследований МГУ им. М.В.Ломоносова, Москва, Россия

MODELING THE PROPAGATION OF A GEOEFFECTIVE SOLAR PROMINENCE IN JUNE 2024

K.B. Kaportseva[1, 2], Yu.S. Shigay[1], A.A. Vakhrusheva[1,2], A.O. Shiryaev[1,3]

[1]Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics of Moscow State University, Moscow, Russia, kb.kaportceva@physics.msu.ru
[2] Moscow State University, Physics Department, Moscow, Russia,
[3] Moscow State University, Space Research Department, Moscow, Russia,

Аннотация. В работе исследуется распространение в гелиосфере коронального выброса массы, связанного с отрывом протяжённого протуберанца в западной части солнечного диска 25.06.2024. Возмущенный поток солнечного ветра наблюдался у Земли 27–29 июня 2024 г. До прихода ударной волны регистрировалось усиленное и упорядоченное магнитное поле с отрицательной Bz-компонентой межпланетного магнитного поля до −15 нТл, что инициировало развитие магнитной бури с падением Dst индекса до −80 нТл. Приход ударной волны 28.06.2024 сопровождался скачком плотности и усилением отрицательной Bz-компоненты до −25 нТл, что привело к усилению бури до Dst = −114 нТл (G4). Приход возмущения наблюдался также на КА STEREO-A, находившемся западнее Земли на ~17°. Выполнено моделирование распространения КВМ с использованием DBM+Cone модели для двух точек гелиосферы. Показано, что наблюдаемая последовательность прихода возмущения на ACE и STEREO-A противоречит модельным оценкам, что может быть связано со сложной структурой межпланетного возмущения.

Ключевые слова: протуберанец, корональный выброс масс, солнечный ветер, магнитная буря.

Abstract. The propagation of an interplanetary coronal mass ejection (ICME) associated with the eruption of an extended solar prominence on 25 June 2024 from the western part of the solar disk is investigated. Disturbed solar wind conditions near Earth were observed on 27–29 June 2024. Before the arrival of the shock wave, an interval of enhanced and ordered magnetic field with a southward Bz component reaching −15 nT was detected, leading to the development of a geomagnetic storm with a minimum Dst index of −80 nT. The arrival of the shock on 28 June 2024 was accompanied by a density enhancement and a further decrease of the Bz component down to −25 nT, resulting in the intensification of the storm to Dst = −114 nT (G4 level). The disturbance was also observed by the STEREO-A spacecraft located about 17° west of Earth. The propagation of the CME was modeled for two heliospheric locations using the DBM+Cone model. It is shown that the observed sequence of disturbance arrival at ACE and STEREO-A contradicts the modeled estimates, which may be related to the complex structure of the interplanetary disturbance.

Keywords: solar prominence, coronal mass ejection, solar wind, magnetic storm.

ВВЕДЕНИЕ

Межпланетные корональные выбросы масс (МКВМ) являются основными источниками сильных геомагнитных возмущений. Плазму МКВМ можно отличить от других потоков солнечного ветра по ряду сигнатур, хотя точные критерии и минимальный набор признаков варьируются у разных авторов [Gosling, 1990; Cane and Richardson, 2003; Zurbuchen and Richardson, 2006; Yermolaev et al., 2009]. Основными критериями считаются отрицательный градиент плотности, свидетельствующий о прохождении расширяющейся структуры, повышение амплитуды магнитного поля, вращение вектора магнитного поля и пониженная протонная температура плазмы. Ионный состав также может указывать на принадлежность потока к МКВМ, однако зарядовые состояния зависят от механизма формирования и источника выброса на Солнце [Aguilar-Rodriguez et al., 2006].

В солнечной короне МКВМ наблюдаются как корональные выбросы массы (КВМ) в белом свете и УФ диапазоне. Протуберанцы — более холодная плазма в области магнитного жгута — на диске наблюдаются как тёмные волокна в линии H-alpha [Filippov, 2024]. На лимбе они, наоборот, видны как яркие структуры на фоне короны. Протуберанцы составляют лишь небольшую часть магнитного жгута: холодная плазма концентрируется в нижней части магнитной трубки, тогда как в верхней формируется корональная полость [Gibson et al., 2015]. Наблюдения показывают статистическую связь отрывов волокон и протуберанцев с регистрацией МКВМ у Земли [Lepri and Zurbuchen, 2010]. Однако низкозарядовые ионы протуберанцев редко фиксируются на 1 а.е. Возможными причинами считаются продолжающийся нагрев и рекомбинация, неоднородное распределение вещества, распад протуберанца и отклонение траектории его движения от основной части выброса [Sharma and Srivastava, 2012; Wang et al., 2018]. Поэтому КВМ, связанные с отрывом протуберанца, могут формировать сложные неоднородные структуры, затрудняющие моделирование и прогнозирование.

В работе рассмотрено событие, связанное с выбросом протуберанца, вызвавшего бурю уровня G4, тогда как оперативные прогнозы NASA/NOAA предсказывали более поздний приход и лишь слабую геомагнитную активность G1.

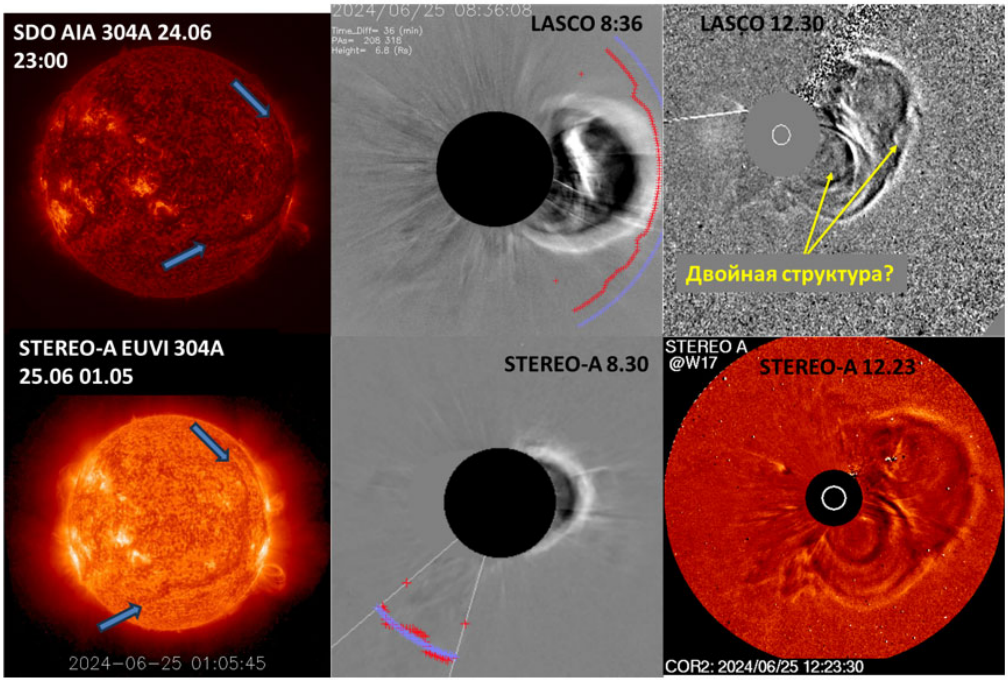

Рис. 1. Изображение волокна в длине волны 304 А и соответствующего КВМ в коронографе (разностные снимки) из точки наблюдения, расположенной на линии Солнце-Земля (сверху, SDO, SOHO), и для точки наблюдения с КА STEREO-A (снизу). Синими стрелками указаны примерные местоположения начала и конца волокна. Желтыми стрелками указана двойная структура фронта КВМ.

ДАННЫЕ И МОДЕЛИ

В работе использовались УФ-изображения Солнца, полученные телескопами SDO/AIA [Lemen et al., 2012] и STEREO-A/SECCHI, а также изображения солнечной короны с коронографов SOHO/LASCO (Large Angle Spectroscopic Coronagraph; [Brueckner et al., 1995]) и STEREO-A/SECCHI. Данные плазмы и магнитного поля солнечного ветра были получены на КА ACE [Stone et al., 1998] в точке L1 и КА STEREO-A [Galvin et al., 2008]. В рассматриваемый период STEREO-A находился на расстоянии 0.95 а.е. от Солнца, западнее Земли на 17.4° и севернее на 0.123°.

Основным источником возмущения считается выброс протяженного волокна из западной полусферы Солнца. Согласно базе NASA DONKI, волокно простиралось примерно от N15W55 до S30W15, а отрыв наблюдался 24 июня 2024 г. с 21:40 UT в канале SDO/AIA 304 Å. Изображения волокна и развитие КВМ в короне представлены на рисунке 1. Событие наблюдалось одновременно с линии Солнце–Земля (SDO, SOHO) и из точки STEREO-A. Волокно было протяжённым, а его отрыв продолжался несколько часов. Центр волокна находился в западной части диска, поэтому КВМ распространялся преимущественно в западном направлении, ближе к STEREO-A. В коронографе STEREO-A выброс наблюдался как гало, тогда как SOHO фиксировал преимущественно боковое распространение. Дополнительной особенностью стала сложная двойная структура фронта КВМ, вероятно связанная с геометрией протуберанца и динамическими процессами на западном лимбе Солнца.

Скорость КВМ по данным коронографа LASCO составила 445 км/с согласно базе CDAW CME list, угол раствора конуса — 154° в картинной плоскости. По базе DONKI параметры, определённые фитированием геометрии по данным двух коронографов, составили 556 км/с для скорости и 39° для долготы источника КВМ.

Параметры межпланетной среды и Dst-индекс представлены на рисунке 2. Три вертикальные линии отмечают характерные моменты события. 1) 27.06 в 4:00 — приход магнитной структуры: усиление магнитного поля, упорядоченное поведение его компонент, скачки плотности до 20 см$^{-3}$, отрицательный градиент скорости и низкое плазменное beta. 2) 27.06 в 18:30 — начало магнитной бури: на фоне отрицательной Bz компоненты и повышенной плотности (~15 см$^{-3}$) Dst снизился до –80 нТл. 3) 28.06 в 8:00 — приход ударной волны: плотность возросла до 40 см$^{-3}$, скорость — до 500 км/с, Bz достигла –25 нТл, а буря усилилась до –114 нТл. На STEREO-A ударная волна наблюдалась примерно на 6 часов позже и с меньшей амплитудой. После области сжатия (17:00–24:00 28.06) наблюдались понижение температуры, повышенное содержание гелия, пониженные зарядовые состояния железа и поворот магнитного поля, что может указывать на приход более холодной плазмы протуберанца (линия «4)» на рис. 2). После кратковременного роста SYM-H индекс вновь снизился до –100 нТл, после чего началась фаза восстановления бури.

Для моделирования распространения протуберанца использовалась модель аэродинамического замедления DBM [Vrsnak et al., 2013], в которой ускорение КВМ определяется разностью скоростей выброса и фонового солнечного ветра. Форма фронта задавалась моделью конуса [Zic et al., 2014] (рис. 3, слева).

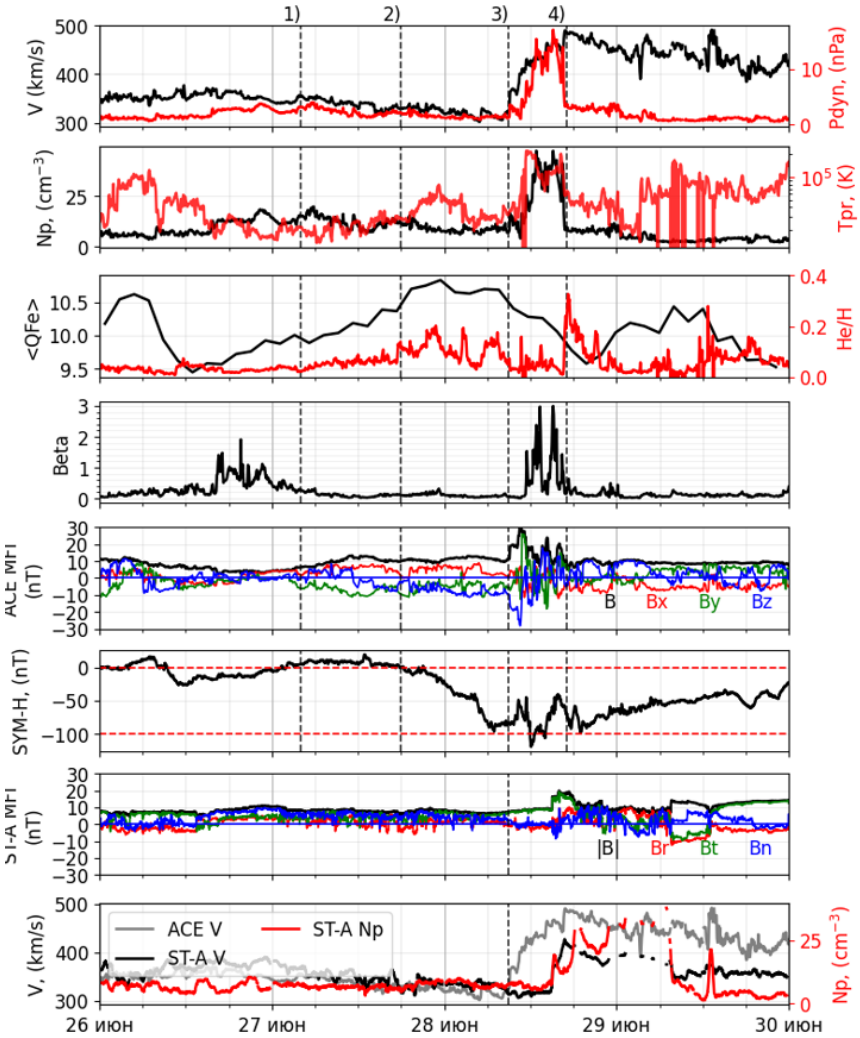

Рис. 2. Параметры солнечного ветра (СВ) и межпланетного магнитного поля (ММП) по данным КА ACE (панели 1-5): панель 1 - скорость (черным) и динамическое давление плазмы (красным); 2 - плотность (черным) и температура протонов (красным); 3 - средний заряд ионов железа (черный) и относительное содержание гелия (красным); 4 - beta плазмы; 5- компоненты и модуль вектора ММП. SYM-H индекс геомагнитной активности (панель 6). Параметры ММП (панель 7) и параметры СВ (панель 8) скорость (черным) и плотность (красным) по данным КА STEREO-A (серой линией дублируется скорость СВ на КА ACE). Все данные указаны за период 26–30 июня 2024 г. Вертикальные линии указывают моменты времени начала характерных периодов, описанных в тексте. Данные получены с помощью библиотеки python cdawsw

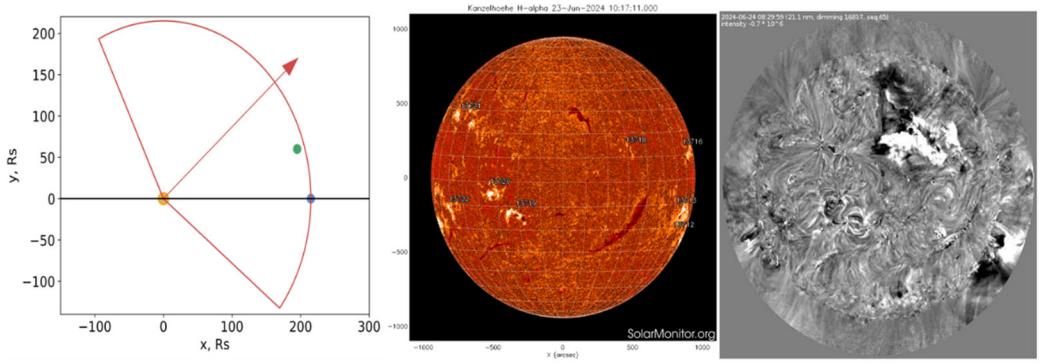

Рис. 3. Слева – иллюстрация нашего моделирования распространения КВМ в модели DBM+Cone. Красная линия отображает фронт КВМ в момент его прибытия на Землю, стрелкой обозначено направление распространения КВМ. Желтой точкой отмечено Солнце, зелёной – КА STEREO-A, синей – Земля. По центру – наблюдение протуберанцев в линии H-alpha 23 июня (изображение с сайта solar monitor, данные Kanzelhoehe Solar Observatory). Справа – наблюдение диммингов 24 июня в 8:25 (изображение с сайта solar demon, данные SDO/AIA 211 A).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Параметры моделирования показывают, что модели DBM+Cone и WSA–Enlil+Cone предсказывали более ранний приход КВМ на КА STEREO-A по сравнению с ACE. Согласно WSA–Enlil+Cone, ударная волна должна была достигнуть STEREO-A 28 июня в 03:43 UT, а ACE — в 14:04 UT, тогда как по наблюдениям ударная волна была зарегистрирована на ACE в 09:00 UT и только в 15:00 UT на STEREO-A. Аналогичную тенденцию показывало и моделирование прихода волокна по DBM: прогнозируемое время составляло 07:40 UT для STEREO-A и 12:00 UT для ACE, тогда как по наблюдениям волокно было зарегистрировано у ACE около 17:00 UT. Таким образом, наблюдения показали противоположную моделям последовательность прихода возмущения.

Возможное объяснение наблюдаемого явления связано с особенностями солнечной активности в рассматриваемый период. 23–24 июня на солнечном диске наблюдалось множество протуберанцев; интенсивная вспышечная активность происходила как на западном лимбе (6 вспышек М-класса из АО 3716, 3712, 3713), так и в восточной полусфере (2 вспышки М-класса из АО 3723, 3720). В работе [Zhukov and Veselovsky, 2007] обсуждаются «глобальные корональные выбросы массы», сопровождающиеся длительными диммингами и крупномасштабной перестройкой магнитного поля. Подобная конфигурация может приводить к нерадиальному распространению КВМ, деформации ударного фронта и асимметричному расширению выброса.

Рассматриваемое событие произошло вблизи максимума 25-го цикла солнечной активности, когда вероятность взаимодействия между крупномасштабными магнитными структурами и эруптивными процессами возрастает. В этих условиях ACE, находившийся вне основного направления распространения КВМ, мог зарегистрировать фланговую или деформированную часть структуры раньше STEREO-A, несмотря на прогнозируемую моделями геометрию распространения.

На наблюдаемую межпланетную структуру мог повлиять отрыв протуберанца 24.06 (6–8 UT) из области N25W10 (рис. 3, центр), сопровождавшийся уменьшением УФ-излучения - диммингом (рис. 3, справа). Событие не наблюдалось в коронографе и, вероятно, представляло собой «stealth CME» [Palmerio et al., 2021], способное повлиять на распространение основного КВМ и вызвать раннее понижение магнитного поля до прихода ударной волны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренное событие 27–29 июня 2024 г. демонстрирует, что КВМ, связанные с протяжёнными протуберанцами, могут формировать сложные межпланетные структуры, существенно отличающиеся от идеализированных моделей распространения. Сравнение наблюдений на КА ACE и STEREO-A с результатами моделирования DBM+Cone и прогнозами WSA–Enlil+Cone показало существенное расхождение во времени прихода ударной волны и геометрии распространения возмущения. В отличие от модельных оценок, ударная волна была зарегистрирована на ACE раньше, чем на STEREO-A. Наблюдаемое расхождение может быть связано с нерадиальным распространением КВМ, деформацией фронта выброса и влиянием сложной магнитной конфигурации короны в период высокой солнечной активности.

Полученные результаты показывают, что в условиях максимума солнечного цикла точность прогнозирования времени прихода и геоэффективности КВМ может существенно снижаться из-за взаимодействия нескольких эруптивных структур и сложной динамики крупномасштабного магнитного поля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Aguilar-Rodriguez E., Blanco-Cano X., Gopalswamy N. Composition and Magnetic Structure of Interplanetary Coronal Mass Ejections at 1 AU // Adv. Space Res. 2006. V. 38, N 3. P. 522–527.

Brueckner G.E., Howard R.A., Koomen M.J., et al. The Large Angle Spectroscopic Coronagraph (LASCO): Visible Light Coronal Imaging and Spectroscopy // Sol. Phys. 1995. V. 162, N 1–2. P. 357–402.

Cane H.V., Richardson I.G. Interplanetary Coronal Mass Ejections in the near-Earth Solar Wind during 1996–2002 // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2003. V. 108, N A4. P. 2002JA009817.

Filippov B. Eruptions on the Sun. Astrophysics and Space Science Library. V. 471. Springer Nature Switzerland, 2024. P. 75-108.

Galvin A.B., Kistler L.M., Popecki M.A., et al. The Plasma and Suprathermal Ion Composition (PLASTIC) Investigation on the STEREO Observatories // Space Sci. Rev. 2008. V. 136, N 1–4. P. 437–486.

Gibson S.E. Coronal Cavities: Observations and Implications for the Magnetic Environment of Prominences // Solar Prominences / Eds. J. Vial, O. Engvold. 2015. P. 323–353.

Gosling J.T. Coronal Mass Ejections and Magnetic Flux Ropes in Interplanetary Space // Geophysical Monograph Series / Eds. C.T. Russell, E.R. Priest, L.C. Lee. V. 58. American Geophysical Union, 1990. P. 343–364.

Lemen J.R., Title A.M., Akin D.J., et al. The Atmospheric Imaging Assembly (AIA) on the Solar Dynamics Observatory (SDO) // Sol. Phys. 2012. V. 275, N 1–2. P. 17–40.

Lepri S.T., Zurbuchen T.H. Direct Observational Evidence of Filament Material within Interplanetary Coronal Mass Ejections // Astrophys. J. 2010. V. 723, N 1. P. L22–L27.

Palmerio E., Nitta N.V., Mulligan T., et al. Investigating Remote-Sensing Techniques to Reveal Stealth Coronal Mass Ejections // Front. Astron. Space Sci. 2021. V. 8. P. 695966.

Sharma R., Srivastava N. Presence of Solar Filament Plasma Detected in Interplanetary Coronal Mass Ejections by in Situ Spacecraft // J. Space Weather Space Clim. 2012. V. 2. P. A10.

Stone E.C., Frandsen A.M., Mewaldt A., Christian E.R., Margolies D. The Advanced Composition Explorer // Space Sci. Rev. 1998. V. 86. P. 1–22.

Wang J., Feng H., Zhao G. Cold Prominence Materials Detected within Magnetic Clouds during 1998–2007 // Astron. Astrophys. 2018. V. 616. P. A41.

Yermolaev Yu.I., Nikolaeva N.S., Lodkina I.G., Yermolaev M.Yu. Catalog of Large-Scale Solar Wind Phenomena during 1976–2000 // Cosmic Res. 2009. V. 47, N 2. P. 81–94.

Zhukov A.N., Veselovsky I.S. Global Coronal Mass Ejections // Astrophys. J. 2007. V. 664, N 2. P. L131–L134.

Zurbuchen T.H., Richardson I.G. In-Situ Solar Wind and Magnetic Field Signatures of Interplanetary Coronal Mass Ejections // Coronal Mass Ejections / Eds. H. Kunow, N.U. Crooker, J.A. Linker, R. Schwenn, R. Von Steiger. Space Sciences Series of ISSI. V. 21. Springer New York, 2006. P. 31–43.

URL: DONKI https://kauai.ccmc.gsfc.nasa.gov/DONKI/view/CME/31695/1 (дата обращения 27.05.2026).

URL: CDAW CME List https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/ (дата обращения 27.05.2026).

URL: python cdasws https://pypi.org/project/cdasws/ (дата обращения 27.05.2026).

URL: NOAA previous predictions https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/swpc-products/daily_reports/3day_forecast/2024/06/202406270030three_day_forecast.txt (дата обращения 27.05.2026).

URL: Solar Monitor https://solarmonitor.org/ (дата обращения 27.05.2026).

URL: Solar Demon https://www.sidc.be/solardemon/science/dimmings.php (дата обращения 27.05.2026).