

ИЗВЕРЖЕНИЕ ПРОТУБЕРАНЦА, ВЫЗВАННОЕ КОРОНАЛЬНЫМ ДОЖДЕМ В СОЛНЕЧНОЙ АТМОСФЕРЕ, НАБЛЮДАЕМОЙ SDO/AIA И STEREO/EUVI

З.М.ВАШАЛОМИДЗЕ¹, Т.В.ЗАКАРАШВИЛИ^{1,2,3}, В.Д.КУХИАНИДЗЕ¹,
Г.Т.РАМИШВИЛИ¹

Поступила 29 марта 2019

Принята к печати 13 сентября 2019

Процесс запуска выброса корональных масс (СМЕ) в солнечной атмосфере изучен не полностью. Мы использовали наблюдения разных космических аппаратов на нескольких длинах волн, чтобы обнаружить процесс неустойчивости протуберанца/волока и последующее извержение СМЕ. Временные ряды спектральных линий 304, 171, 193 и 211 Å получены с космического аппарата SDO, спектральные линии 304, 171, 195 и 284 Å - с космического аппарата STEREO. Система протуберанец/волокно наблюдалась в течение 8-23 ноября 2011г. под разными углами SDO, STEREO_A и STEREO_B. Наблюдения показали, что гигантский торнадо начал подниматься около основания протуберанца в 20:00 UT, 20 ноября, что позже вызвало появление капель коронального дождя (в UT 16:00, 21 ноября), падающих вниз от основной массы протуберанца. Корональный дождь продолжался до UT 20:20, 22 ноября и вызвал неустойчивость протуберанца, вследствие чего UT 22:30, 22 ноября произошел выброс СМЕ. Мы предполагаем, что потеря массы из-за коронального дождя может привести к неустойчивости протуберанцев и их последующему извержению. Наблюдения за корональными дождями, падающих с основной части массы протуберанцев могут быть использованы для прогнозов космической погоды.

Ключевые слова: *корональный дождь; солнечная корона; солнечная атмосфера*

1. *Введение.* Солнечные протуберанцы/волока представляют собой холодные и плотные плазменные структуры в горячей солнечной короне, которые поддерживаются корональным магнитным полем, компенсирующим силу тяжести [1,2]. Иногда протуберанцы теряют стабильность и извергаются в виде СМЕ, что в конечном итоге влияет на космические погодные условия у Земли [3,4]. Инициирование СМЕ, вероятно, связано с некоторым процессом возникновения неустойчивости в солнечной атмосфере [5], который в настоящее время неизвестен [6-8]. Наблюдения показывают, что динамическое поведение протуберанцев/волокон обычно контролируется корональным магнитным полем [9-11]. Одним из важных процессов инициирования СМЕ является неустойчивость торнадо, иногда появляющихся на солнечном лимбе в виде темных вертикальных структур и хорошо видны на снимках Солнца в горячих корональных спектральных линиях [12-16]. Торнадо обычно образуются

возле ножек солнечных волокон и протуберанцев [12,15,17,13,18]. Недавние наблюдения Солнечной динамической обсерватории (SDO) показали, что почти все связанные с протуберанцами торнадо становятся нестабильными, и половина из них приводит к CME, поэтому торнадо может использоваться в качестве эффективного инструмента для предсказаний космической погоды [19].

Другим важным процессом в солнечной атмосфере является корональный дождь - последовательность холодных и плотных плазменных капель, падающих вдоль солнечных корональных петель к их подножию. Корональный дождь, вероятно, вызван тепловой нестабильностью [20,21], он также связан с солнечными протуберанцами, где холодные капли отделяются от основной массы и падают вниз к фотосфере. Недавние наблюдения с Atmospheric Imaging Assembly (AIA) на борту SDO [23,24] показали, что основная масса волокон не является статичной, она поддерживается конденсацией с высокой оценочной скоростью по сравнению с сопоставимым дренажом через многочисленные вертикально-нисходящие потоки [22]. Эти потоки в виде прохладных плотных сгустков проявляются как корональные дожди, падающие с высоты 20-40 Мм. Скорость капель имеет узкое гауссовское распределение со средним значением 30 км/с, в то время как нисходящее ускоряющее распределение имело экспоненциальное падение со средним значением 46 м/с^2 . Предполагалось, что термическая нестабильность, приводящая к образованию коронального дождя, происходит через катастрофическое охлаждение, когда радиационные потери локально превосходят нагрев [25-27]. Численное моделирование также показывает, что катастрофическое охлаждение вследствие термической нестабильности может быть причиной образования холодной конденсации и, следовательно, коронального дождя [28-30].

Когда плазма протуберанца начинает падать в виде коронального дождя, ее масса очевидно уменьшается. Следовательно, направленная вверх сила Лоренца в конечном итоге преодолеет гравитационную силу и этот процесс может привести к неустойчивости протуберанца. В данной работе мы изучаем формирование, динамику и неустойчивость солнечного протуберанца, используя наблюдения SDO/AIA и STEREO/EUVI, а также роль коронального дождя в инициации CME.

2. Наблюдение и анализ данных. Данные наблюдений получены SDO и Обсерваторией Солнечно-Земных связей (STEREO) в течение 8-23 ноября 2011г. AIA/SDO наблюдает за солнцем в каналах с множеством длин волн, обеспечивая изображения с высоким пространственным разрешением 0.6 угл. с на пиксель с частотой 12 с [23,24]. Мы использовали четыре экстремально ультрафиолетовые узкополосные фильтры: 304, 171, 193, 211 Å с соответствующими температурами $10^{4.7}$, $10^{5.8}$, $10^{6.1}$, $10^{6.3}$ К. Установленный

на борту космического корабля STEREO набор научных приборов "Исследование корональных и гелиосферных связей Солнца и Земли" (SECCHI), представляет собой комплект из пяти телескопов, который получал изображения Солнца в экстремальных ультрафиолетовых диапазонах (304, 171, 195, 284 Å) с помощью прибора EUVI (Extreme Ultraviolet Imager) [31-33]. Мы использовали только 304, 195, а также 171 Å, если оно появлялось в наборах данных. SECCHI/EUVI обеспечивает изображения с высоким пространственным разрешением 1.6 угл.с на пиксель всего солнечного диска (изображения 2048 x 2048 пикселей) [31-33]. Спутники SDO и STEREO наблюдают за Солнцем под разными углами, что позволяет детально отслеживать структуру и динамику протуберанцев. Угол разделения между SDO и STEREO_B (STEREO_A) во время нашего наблюдения составлял -104° ($+106^{\circ}$) по отношению к SDO. В то же время линия западного края изображения SDO (западный лимб) находится на $+14^{\circ}$ внутри STEREO_B, а линия восточного края SDO на $+16^{\circ}$ внутри на STEREO_A. (рис.1). Чтобы идентифицировать конкретные точки на Солнце на обоих космических кораблях STEREO и SDO, мы использовали процедуру SSW (Solar Software) базы STEREO wcs_convert_diff_rot, которая позволяет определять положения конкретных точек на изображениях обоих космических аппаратов.

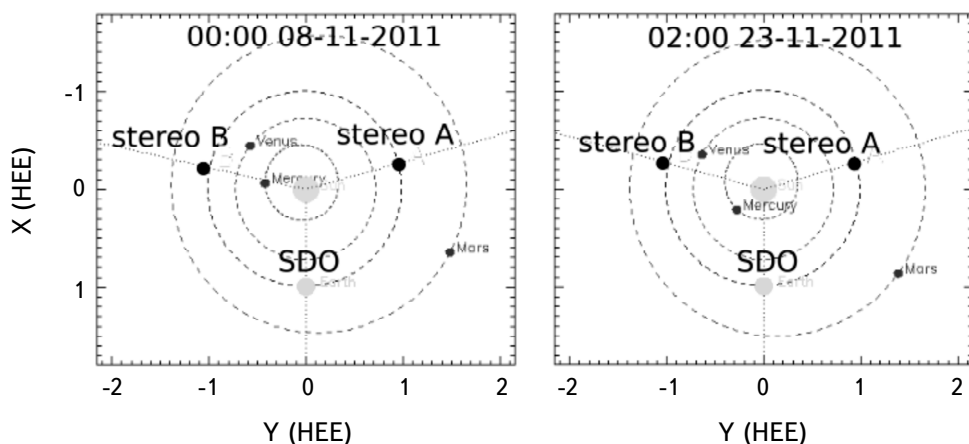


Рис.1. Расположение SDO, STEREO_A и STEREO_B во время наблюдения (ноябрь 2011г.). Линия западного края изображения SDO (западный лимб) находится на $+14^{\circ}$ внутри STEREO_B, а линия восточного края SDO на $+16^{\circ}$ внутри на STEREO_A.

Наблюдения структуры и динамики протуберанца велись в течение ноября 2011г. Протуберанец/волокно наблюдался на снимках STEREO_B до 14 ноября. Между тем, на SDO он появился 8-го ноября и был замечен до 23-го ноября. Когда протуберанец впервые появился на западном лимбе в изображениях SDO, то он был замечен на диске около восточного лимба в

изображениях STEREO_B. На рис.2 показана система протуберанцев/волокон 10 ноября (верхние панели) и 14 ноября (нижние панели). На левых панелях приведены составные (композитные, разные длины волн на одном изображении) изображения STEREO_B, а на правых панелях - составные изображения SDO/AIA.

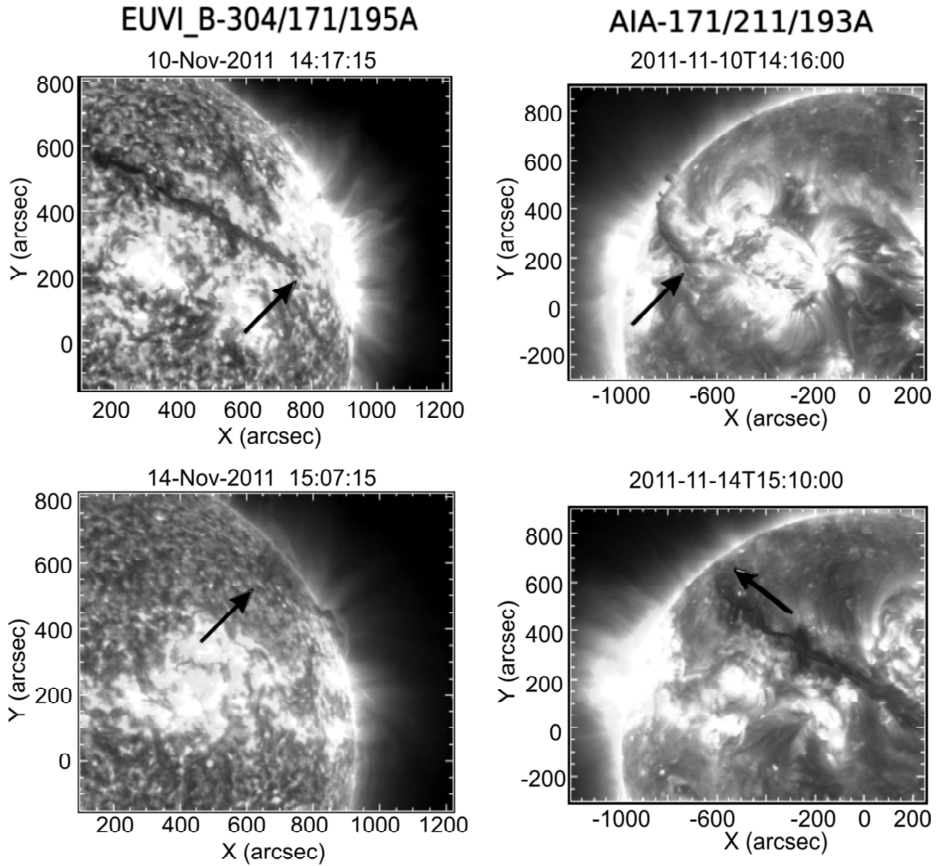


Рис.2. Эволюция протуберанца/волока в течение 10-14 ноября. В левом столбце показаны композитные изображения в EUVI, составленные из трех спектральных линий 171, 195, 304 Å STEREO_B в UT 14:17, 10 ноября (верхняя панель) и в UT 15:07, 14 ноября (нижняя панель). В правом столбце показаны композитные изображения, составленные из трех спектральных линий 171, 193, 211 Å в SDO/AIA в UT 14:16, 10 ноября (верхняя панель) и в UT 15:10, 14 ноября (нижняя панель). Черные стрелки на верхних панелях указывают на правый край протуберанца, если смотреть под разными углами. Стрелки на нижних панелях показывают левый край протуберанца от обоих космических аппаратов.

Протуберанец пересекал весь солнечный диск в течение следующих нескольких дней. 17 ноября он появился на изображениях космического корабля STEREO_A, в то время как он все еще был виден в восточной части солнечного диска на SDO/AIA, а 20 ноября достиг восточного лимба. На

рис.3 показана система протуберанцев SDO и STEREO_A 18 ноября (верхние панели) и 20 ноября (нижние панели). Левая и правая панели показывают

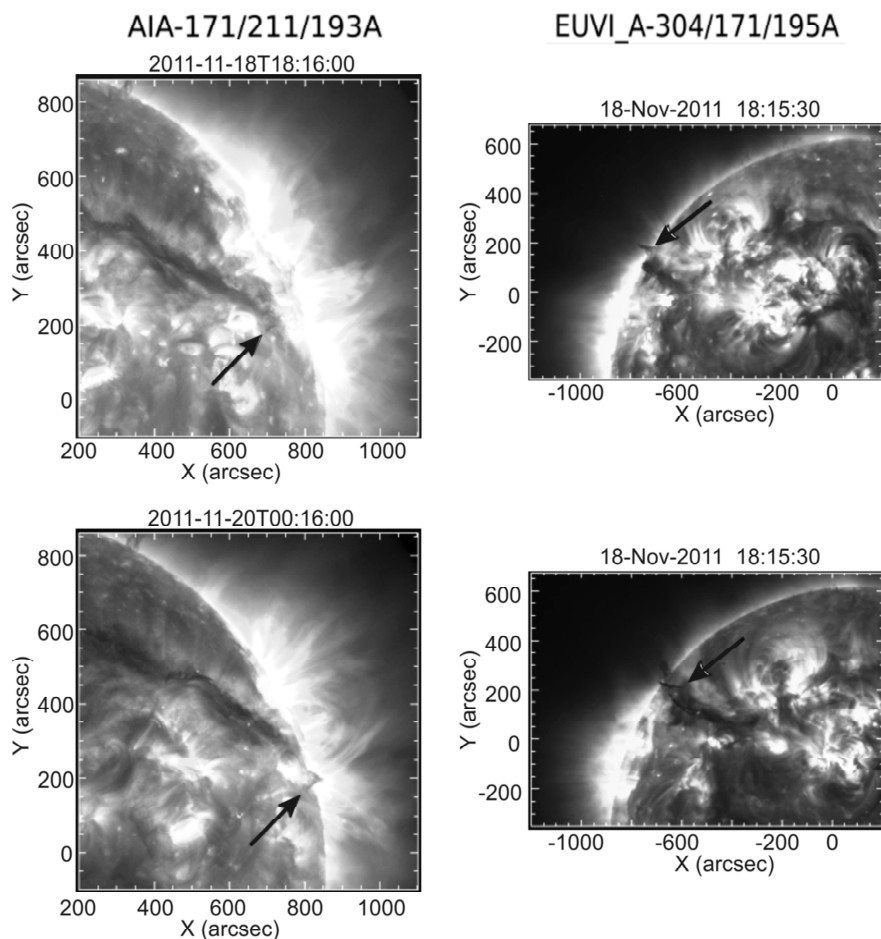


Рис.3. Эволюция протуберанца/волока в течение 18-20 ноября. В левом столбце показаны составные (композитные) изображения в SDO/AIA в UT 18:16, 18 ноября (верхняя панель) и в UT 16:00, 20 ноября (нижняя панель). В правом столбце показаны составные (композитные) изображения в EUVI/STEREO_A в UT 18:15, 18 ноября (верхняя панель) и в UT 15:31, 20 ноября (нижняя панель). Черные стрелки указывают на расположение торнадо вблизи опор волокна.

аналогичные составные (композитные) изображения как на рис.2. С 20:16 UT (20 ноября) до 12:14 UT (21 ноября) из нижних областей около опоры протуберанца начал подниматься вверх торнадо (рис.4). Торнадо более отчетливо виден на изображениях STEREO_A/EUVI в виде темной вертикальной структуры (правая колонка).

Когда торнадо достиг максимальной высоты, с основной массы волокна начали падать капли дождя. Дождь начался в UT 16:00 21 ноября. На рис.5

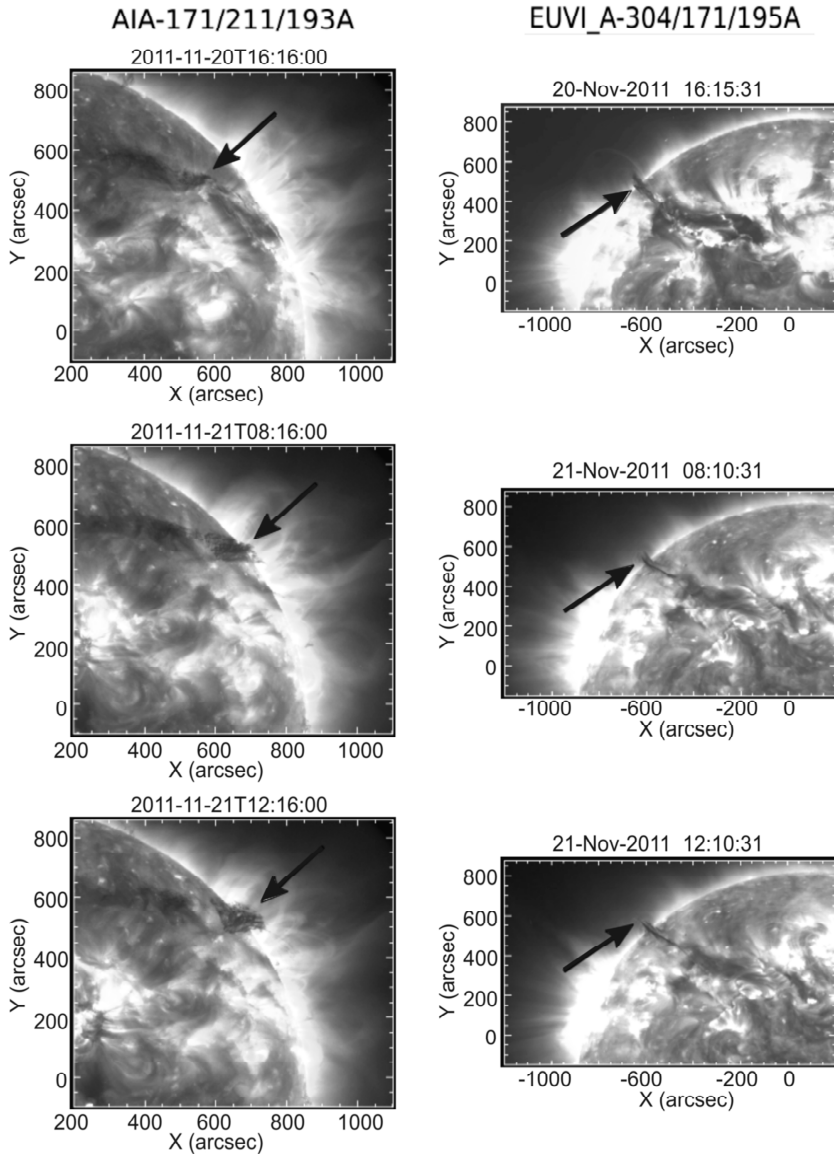


Рис.4. Подъем торнадо у подножия протуберанца в 20-21 ноября. В левом столбце показаны составные (композитные) изображения в SDO/AIA: в UT 16:16 20 ноября (верхняя панель), в UT 08:16 21 ноября (средняя панель) и в UT 12:16 21 ноября (нижняя панель). В правом столбце показаны составные (композитные) изображения в EUVI/STEREO_A: в UT 16:15 ноября (верхняя панель), в UT 08:10 21 ноября (средняя панель) и UT 12:10 21 ноября (нижняя панель). Черные стрелки показывают эволюцию торнадо.

показаны корональные траектории дождя (вдоль корональных петель) с обоих космических аппаратов. Плазма стекала в течение почти тридцати часов, что означает, что значительная часть массы протуберанца была истощена

дождем. Белые стрелки указывают места вблизи поверхности, где падали капли коронального дождя.

Сравнительная яркость этих областей показывает, что либо капли дождя

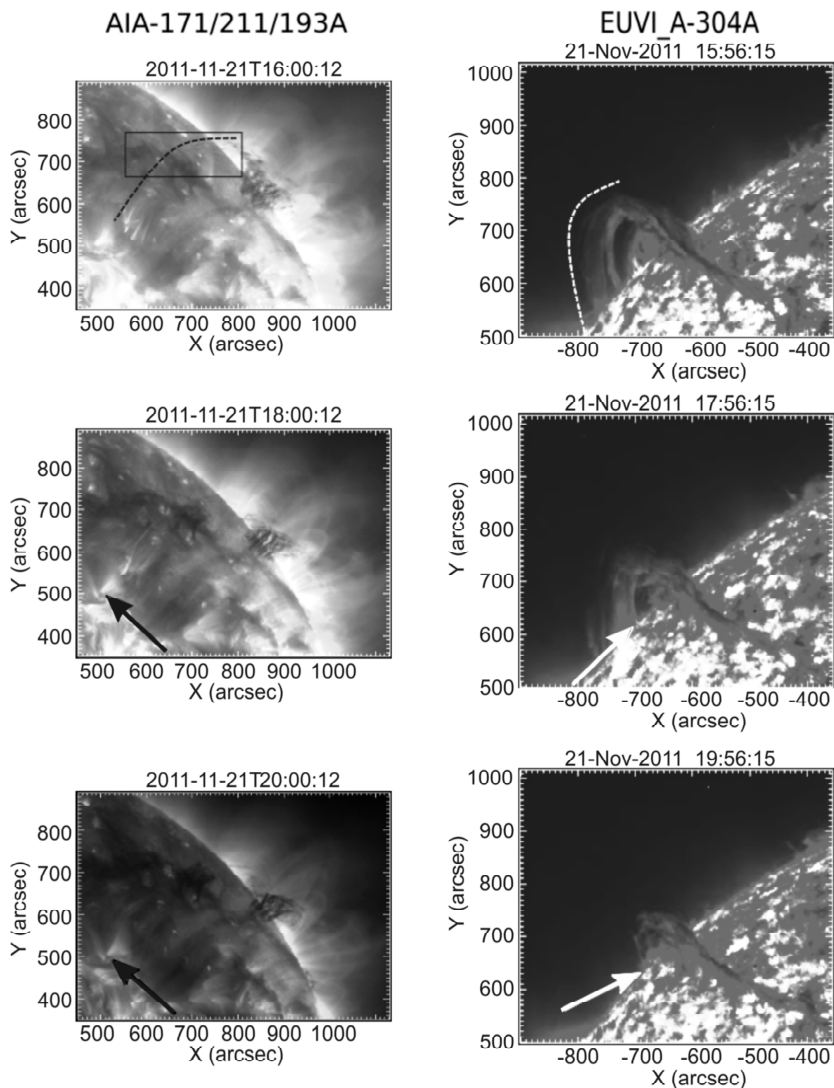


Рис.5. Корональный дождь в течение 21 ноября из SDO и STEREO_A. В левом столбце показаны составные (композитные) изображения SDO/AIA. Верхняя, средняя и нижняя панели соответствуют UT 16:00, UT 18:00 и UT 20:00 21 ноября, соответственно. Черный прямоугольник указывает на область падающих капель, как показано на рис.6. Пунктирная линия - это траектория падающих капель, а черные стрелки указывают места, где они падают. Правый столбец показывает канал 304A в EUVI/STEREO_A. Верхняя, средняя и нижняя панели соответствуют UT 15:56, UT 17:56 и UT 19:56, 21 ноября, соответственно. Белые стрелки указывают те же точки на изображениях STEREO, что и на изображениях SDO, обозначенных черными стрелками.

в короне нагреваются во время падения, либо они нагревают хромосферную плазму во время столкновения.

На рис.6 показана динамика одной капли дождя в течение 30 мин. Эти панели представляют область, ограниченную черным прямоугольником в верхней левой панели на рис.5. Черные стрелки указывают местоположение капли в определенное (конкретное) время. Капля переместилась примерно на 70 Мм в течение 30 мин со средней скоростью 40 км/с.

После 28 часов коронального дождя (потери массы) протуберанец стал нестабильным. На рис.7 показана временная динамика протуберанца в течение

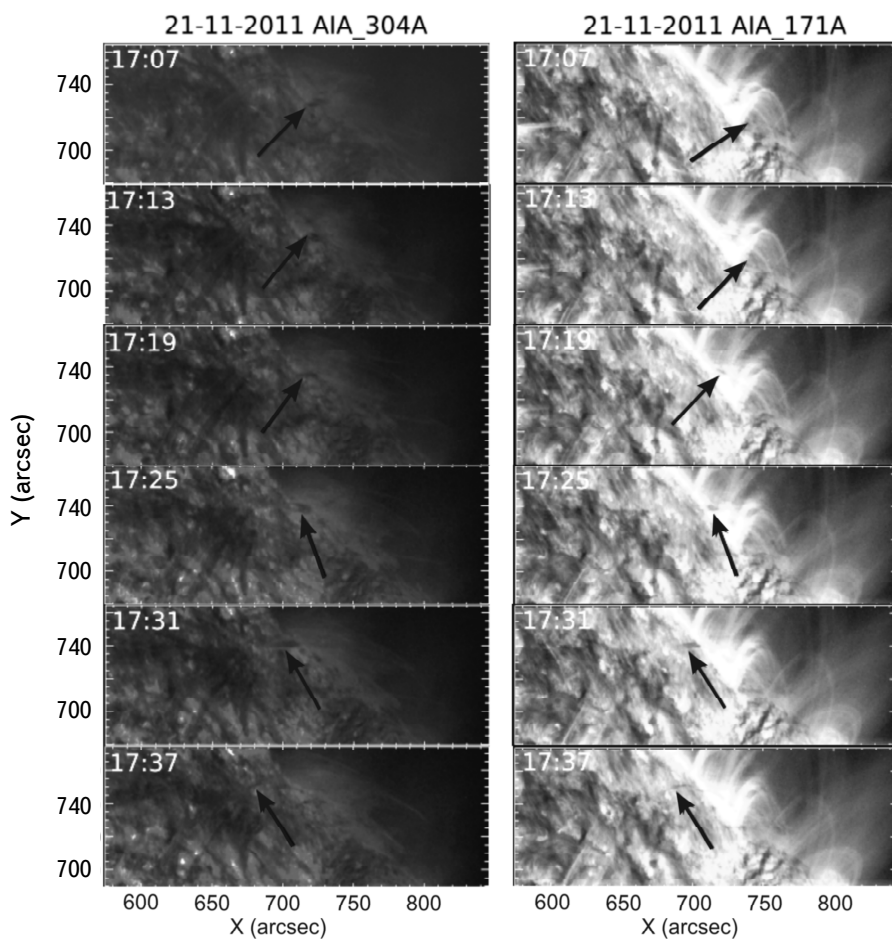


Рис.6. Движение одной капли дождя в короне, в области черного прямоугольника, отмеченного на верхней левой панели рис.5. Динамика корональной капли дождя показана в течение 30 мин с интервалом 6 мин между последовательными панелями (сверху вниз). В левом (правом) столбце показаны изображения в спектральной линии 304 Å (171 Å) SDO/AIA. Черные стрелки указывают на места корональной капли дождя в последовательные моменты времени.

UT 20:00-24:00, 22 ноября, видимая со стороны SDO и STEREO-A. Нестабильность протуберанца начинается около UT 20:20 (верхние панели), когда составляющий его материал поднимается вверх. Через час (средние панели) протуберанец уже значительно поднялся наверх (это особенно хорошо видно на левых панелях). Примерно через три часа (около 23:30 UT) протуберанца

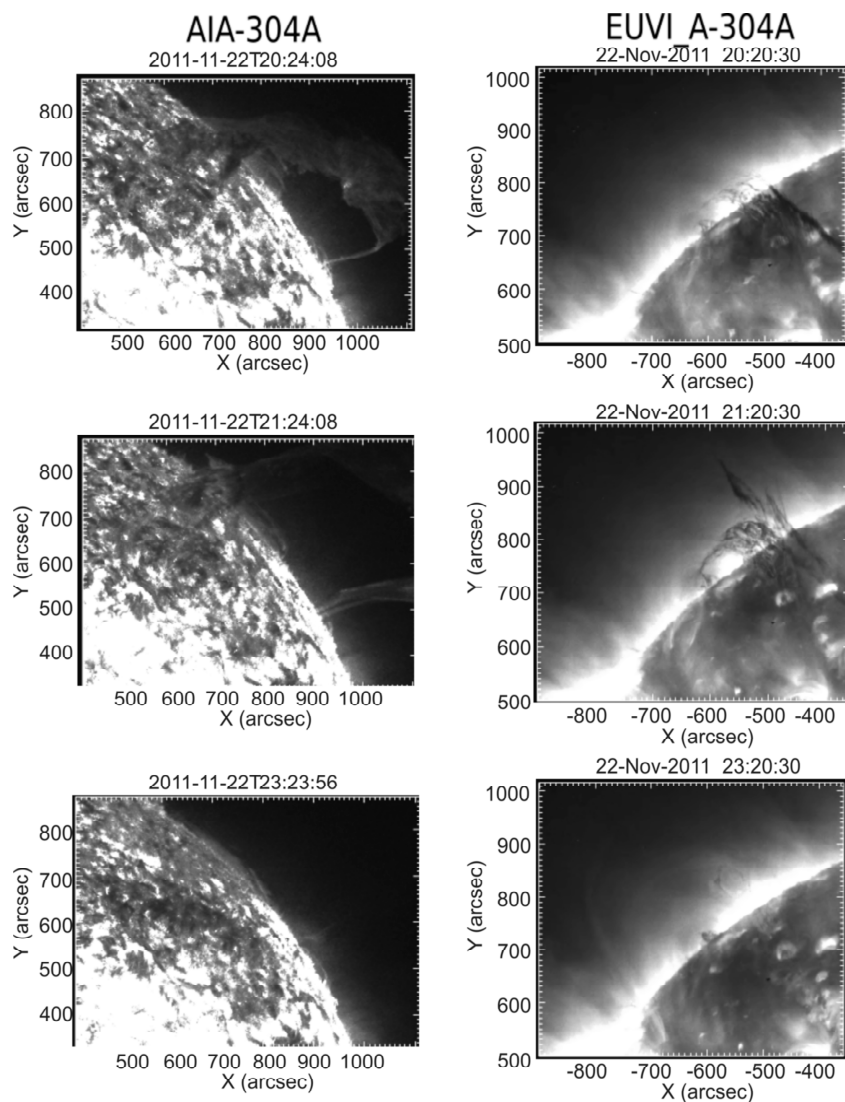


Рис.7. Дестабилизация (потеря равновесия) и извержение (выброс) протуберанца после коронального дождя. В левом столбце показаны три разных изображения в SDO/AIA 304 Å. Верхняя, средняя и нижняя панели соответствуют UT 20:24, UT 21:24 и UT 23:24, 22 ноября, соответственно. Правый столбец показывает три разных изображения в канале STEREO_A 193 Å. Верхняя, средняя и нижняя панели соответствуют UT 20:20, UT 21:20 и UT 23:20, 22 ноября.

уже не видно на линиях AIA и EUVI (нижние панели), поскольку он извергается как СМЕ.

Когда волокно исчезло в корональных линиях, очевидно, оно появилось на изображениях белого света коронографов STEREO-A (COR1 и COR2) как СМЕ. На рис.8 показана временная динамика СМЕ во внешней короне, наблюдаемая из STEREO-A. COR1 наблюдает в видимом свете на расстояниях от 1.5 до 4 солнечных радиусов от центра, в то время как COR2 - от 2 до 15 солнечных радиусов. Очевидно, что СМЕ появился на снимках COR1 в UT 22:30, т.е. через час после подъема из нижней короны. Следовательно, средняя скорость подъема СМЕ была около 200 км/с.

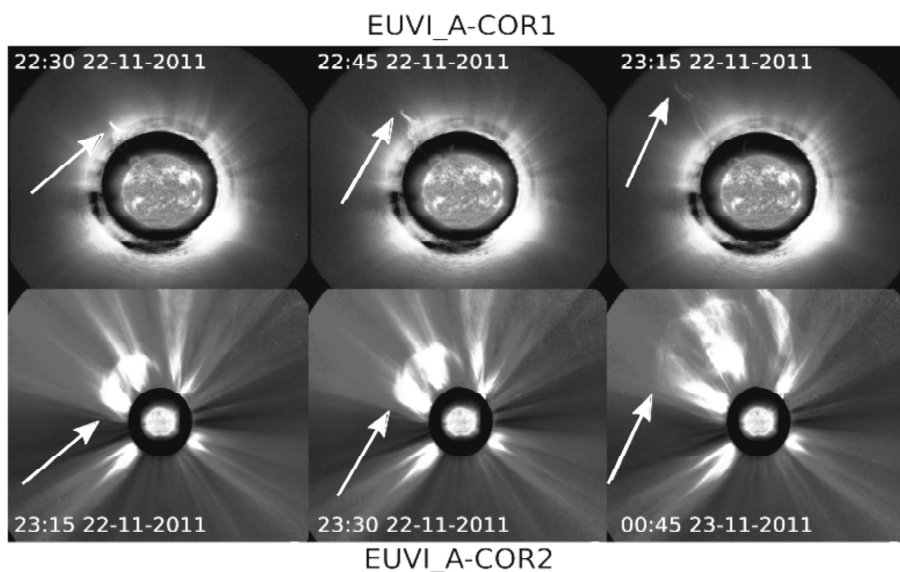


Рис.8. Извержение СМЕ, как видно из STEREO_A. Верхние панели показывают три последовательных изображения СМЕ в COR1 STEREO_A. COR1 отображает изображения белого света на расстояниях от 1.5 до 4 солнечных радиусов от солнечного центра. Солнце в EUVI-A_304 Å показано в центральной части каждого изображения. Белые стрелки указывают местоположение СМЕ. СМЕ появился в окне COR1 около 22:30 22 ноября и оставил его в 23:15 (верхняя правая панель). Нижние панели показывают временную эволюцию СМЕ в COR2 STEREO_A. COR2 отображает изображения белого света на расстояниях от 2 до 15 солнечных радиусов от солнечного центра. Солнце в EUVI-A_195 Å показано в центральной части каждого изображения.

Временная динамика протуберанца показала нам, что нестабильность, которая привела к СМЕ, началась после почти 30-часового оттока каплей коронального дождя из основного тела (массы) протуберанца. Для объяснения возникновения нестабильности протуберанца предполагается следующий сценарий. Волокна почти в 100 раз плотнее, чем окружающая корональная плазма, поэтому они должны быстро падать к поверхности под действием

силы тяжести. Но гравитационная сила уравнивается магнитным полем, которое, вероятно, растягивается из-за большой массы протуберанца. Если корональный дождь непрерывно отнимает часть массы от волокна, то гравитационная сила в конечном итоге ослабевает, что должно привести к поднятию вверх оставшейся части протуберанца из-за избыточной силы Лоренца. Это может привести к магнитному пересоединению или похожему процессу, который вызывает глобальную нестабильность протуберанца и, следовательно, СМЕ.

3. *Выводы.* Наблюдения за солнечным протуберанцем на нескольких космических аппаратах на разных длинах волн проводились от UT 00:00, 8 ноября, до UT 00:45, 23 ноября 2011 г. Мы использовали данные наблюдений спутников AIA/SDO, EUVI/STEREO_A и EUVI/STEREO_B.

SDO, STEREO_A и STEREO_B, наблюдали Солнце с трех разных углов, поэтому мы смогли проследить детальную динамику протуберанца/волокна с высоким пространственным разрешением. За наблюдаемый промежуток времени протуберанц пересек весь солнечный диск на изображениях SDO. Мы наблюдали образование торнадо у подножия протуберанца, которое в конце концов начало расти примерно в 20:00 UT, 20 ноября. Когда торнадо достигло высоты протуберанца, корональный дождь начал стекать с его основной части около 16:00 21 ноября по UT. После почти 30 часов дождя система стала нестабильной в UT 20:20 и изверглась как СМЕ в UT 22:30, 22 ноября. Мы предполагаем, что потеря массы из-за коронального дождя привела к нестабильности протуберанцев и спровоцировала СМЕ. Если будущие наблюдения покажут, что корональный дождь является распространенным процессом для инициирования СМЕ, то он может использоваться для прогнозов космической погоды.

Работа была поддержана Национальным научным фондом им. Шота Руставели (SRNSF) [PhDF2016_147], грантом DI-2016-52 и грантом 217146.

¹ Абастуманская астрофизическая обсерватория им. Е.К.Харадзе, Государственный университет им. Илии, Тбилиси, Грузия, e-mail: zurab.vashalomidze.i@iliauni.edu.ge vaso@iliauni.edu.ge

² Space Research Institute, Austrian Academy of Sciences, Schmiedlstrasse 6, 8042 Graz, Austria, e-mail: teimuraz.zaqrashvili@uni-graz.at

³ IGAM-Kanzelhoe Observatory, Institute of Physics, University of Graz, Universitatsplatz 5, 8010 Graz, Austria

PROMINENCE ERUPTION TRIGGERED BY CORONAL RAIN IN THE SOLAR ATMOSPHERE OBSERVED BY SDO/AIA AND STEREO/EUVI

Z.M.VASHALOMIDZE¹, T.V.ZAQARASHVILI^{1,2,3}, V.D.KUKHIANIDZE¹,
G.T.RAMISHVILI¹

Triggering process for Coronal Mass Ejection (CME) in the solar atmosphere is not fully understood. We use multi-spacecraft and multi-wavelength observations to detect the process of prominence/filament instability and consequent eruption of CME. We use time series of 304, 171, 193 and 211 Å spectral lines from SDO spacecraft and 304, 171, 195 and 284 Å spectral lines from STEREO spacecraft. Prominence/filament system has been observed during November 08-23, 2011, from different angles by SDO, STEREO_A and STEREO_B. Observations show that a giant tornado started to rise up near the prominence leg at 20:00 UT, November 20, which later caused coronal rain blobs (at UT 16:00, November 21) flowing downwards from the prominence main body. The coronal rain continued till UT 20:20, November 22, and triggered the instability of the prominence, which erupted as a CME at UT 22:30, November 22. We suppose that the mass loss due to the coronal rain may lead to the instability of prominence and to the consequent eruption of CME. If confirmed, coronal rain observations from prominence main body could be used for space weather predictions.

Keywords: *coronal rain: solar corona: solar atmosphere*

ЛИТЕРАТУРА

1. N.Labrose, P.Heinzel, J.-C.Vial *et al.*, Space Sci. Rev., **151**, 243, 2010.
2. I.Arregui, R.Oliver, J.L.Ballester, Living Rev. Solar Phys., **9**, 2, 2012.
3. B.Schmieder, L. van Driel-Gesztelyi, G.Aulanier *et al.*, Adv. Space Res., **29** 1451, 2002.
4. N.Gopalswamy, M.Shimojo, W.Lu *et al.*, Astrophys. J., **586**, 562, 2003.
5. E.R.Priest, T.G.Forbes, Astron. Astrophys., **10**, 313, 2002.
6. J.B.Zirker, O.Engvold, S.F.Martin, Nature, **396**, 440, 1998.
7. J.Chae, C.Denker, T.J.Spirock *et al.*, Sol. Phys., **195**, 333, 2000.
8. Q.M.Zhang, T.Li, R.S.Zheng *et al.*, Astrophys. J., **842**, 27, 2017a.
9. Z.Ning, W.Cao, P.R.Goode, Astrophys. J., **707**, 1124, 2009b.
10. Y.Shen, Y.Liu, Y.D.Liu *et al.*, Astrophys. J., **814**, L17, 2015.

11. *Q.M.Zhang, D.Li, Z.J.Ning*, *Astrophys. J.*, **851**, 47, 2017b.
12. *Y.Su, T.Wang, A.Veronig et al.*, *Astrophys. J.*, **756**, L41, 2012.
13. *X.Li, H.Morgan, D.Leonard et al.*, *Astrophys. J.*, **752**, L22, 2012.
14. *N.K.Panesar, D.E.Innes, S.K.Tiwari et al.*, *Astron. Astrophys.*, **549**, A105, 2013.
15. *S.Wedemeyer-Böhm, E.Scullion, L.Roupe van der Voort et al.*, *Astrophys. J.*, **774**, 123, 2013.
16. *N.K.Panesar, D.E.Innes, D.J.Schmit et al.*, *Sol. Phys.*, **289**, 2971, 2014.
17. *S.Wedemeyer-Böhm, E.Scullion, O.Steiner et al.*, *Nature*, **486**, 505, 2012.
18. *I.Mghebrishvili, T.V.Zaqarashvili, V.Kukhianidze et al.*, *Astrophys. J.*, **810**, 89, 2015.
19. *I.Mghebrishvili, T.V.Zaqarashvili, V.Kukhianidze et al.*, *Astrophys. J.*, **861**, 112, 2018.
20. *E.N.Parker*, *Astrophys. J.*, **117**, 431, 1953.
21. *G.B.Field*, *Astrophys. J.*, **142**, 531, 1965.
22. *W.Liu, T.E.Berger, B.C.Low*, *Astrophys. J. Lett.*, **745**, L21, 8, 2012.
23. *W.D.Pesnell, B.J.Thompson, P.C.Chamberlin*, *Sol. Phys.*, **275**, 3, 2012.
24. *J.R.Lemen, A.M.Title, D.J.Akin et al.*, *Sol. Phys.*, **275**, 17, 2012.
25. *S.K.Antiochos, P.J.MacNeice, D.S.Spicer et al.*, *Astrophys. J.*, **512**, 985, 1999.
26. *C.J.Schrijver*, *Sol. Phys.*, **198**, 325, 2001.
27. *Z.Vashalomidze, V.Kukhianidze, T.V.Zaqarashvili et al.*, *Astron. Astrophys.*, **577**, A136, 2005.
28. *D.A.N.Müller, V.H.Hansteen, H.Peter*, *Astron. Astrophys.*, **411**, 605, 2003.
29. *D.A.N.Müller, H.Peter, V.H.Hansteen*, *Astron. Astrophys.*, **424**, 289, 2004.
30. *D.A.N.Müller, A. De Groof, V.H.Hansteen et al.*, *Astron. Astrophys.*, **436**, 1067, 2005.
31. *R.A.Howard, J.D.Moses, A.Vourlidas et al.*, *Space Sci. Rev.*, **136**, 67, 2008.
32. *J.-P.Wüelser, J.R.Lemen, T.D.Tarbell et al.*, *SPIE Conf. Ser.*, **5171**, 111, 2004.
33. *J.-P.Wüelser, J.R.Lemen, N.Nitta*, *SPIE Conf. Ser.*, **6689**, 2007.
34. *W.T.Thompson*, *Icarus*, **2000**, 351, 2009.

