

СВЯЗЬ НАРАСТАНИЯ СКОРОСТИ КВМ НА НАЧАЛЬНОМ ЭТАПЕ ДВИЖЕНИЯ С ИЗМЕНЕНИЕМ МАГНИТНЫХ УСЛОВИЙ В ОБЛАСТИ ЗАРОЖДЕНИЯ ВЫБРОСА МАССЫ

RELATIONSHIP BETWEEN INCREASING CME VELOCITY AT THE INITIAL STAGE OF MOTION AND CHANGE IN MAGNETIC CONDITIONS IN THE MASS EJECTION GENERATING AREA

В.Г. Файнштейн 

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, vfain@iszf.irk.ru*

Г.В. Руденко 

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, rud@iszf.irk.ru*

Ю.С. Загайнова

*Институт земного магнетизма, ионосферы
и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,
Москва, Троицк, Россия, yuliazagaynova@mail.ru*

V.G. Fainshtein

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

G.V. Rudenko

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

Yu.S. Zagaynova

*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere,
and Radio Wave Propagation RAS,
Moscow, Troitsk, Russia, yuliazagaynova@mail.ru*

Аннотация. Работа имеет дискуссионный характер, так как опирается на предположения, требующие серьезного экспериментального подтверждения. Сделана попытка связать нарастание скорости коронального выброса массы (КВМ) на начальной стадии его движения с уменьшением свободной магнитной энергии E_{free} в активной области. Кроме этого, рассмотрено, как для отобранного события меняется магнитная спиральность M_h в активной области. Анализировалось движение относительно энергичного КВМ типа гало (далее гало-КВМ) с кинетической энергией $5.2 \cdot 10^{31}$ эрг, зарегистрированного 26 ноября 2011 г. и связанного со слабой рентгеновской вспышкой балла C1.2. Показано, что в период нарастания со временем E_{free} и последующего ее спада при увеличении скорости КВМ магнитная спиральность меняется аналогичным образом: при увеличении E_{free} увеличивается M_h и наоборот. Для сравнения показаны изменения E_{free} и M_h во время события, связанного с сильной рентгеновской вспышкой балла X3.1 и не связанного с КВМ. Оказалось, что в этом случае при самом сильном спаде E_{free} M_h возрастает.

Ключевые слова: активная область, корональный выброс массы, вспышка, свободная магнитная энергия, магнитная спиральность.

Abstract. The paper is controversial since it is based on assumptions that require serious experimental confirmation. An attempt has been made to relate an increase in the coronal mass ejection (CME) velocity at the initial stage of its motion with a decrease in the free magnetic energy E_{free} in the active region. In addition, we have examined how magnetic helicity M_h changes in the active region during the selected event. We have analyzed the motion of relatively energetic halo-type CME (the CME kinetic energy is $5.2 \cdot 10^{31}$ erg) recorded on November 26, 2011 and linked to a C1.2 X-ray flare. It has been shown that when E_{free} increases with time and decreases with rising CME velocity the magnetic helicity varies in the same way: with increasing E_{free} , M_h intensifies and vice versa. For comparison, we show E_{free} and M_h variations during the event related to an X3.1 X-ray flare and unrelated to CME. It turned out that in this case M_h intensifies during the strongest decrease in E_{free} .

Keywords: active region, coronal mass ejection, flare, free magnetic energy, magnetic helicity.

ВВЕДЕНИЕ

Корональные выбросы массы (КВМ) — магнитно-плазменные структуры, регулярно выбрасываемые из солнечной атмосферы в межпланетное пространство, вынося туда значительное количество массы, энергии и магнитного потока [Webb, Howard, 2012; Gopalswamy, 2016]. КВМ ответственны за самые сильные проявления космической погоды на Земле, включая мощные геомагнитные бури [Baker et al., 2008]. Все это определяет важность исследования

КВМ, включая закономерности их формирования. Сегодня считается, что энергия КВМ, которая может достигать $ед \cdot 10^{32}$ эрг, черпается из солнечного магнитного поля (см. обзоры [Forbes, 2000; Klimchuk, 2001]). В то же время механизмы трансформации энергии магнитного поля в энергию КВМ во многом остаются невыясненными.

Наличие электрических токов в солнечной короне может обеспечить в активной области (АО) свободную магнитную энергию E_{free} , которая частично трансформируется в энергию КВМ и опре-

деляется как разность между энергиями данного магнитного и потенциального полей, имеющих одинаковую нормальную компоненту на границе выделенного объема. Расчеты E_{free} обычно опираются на 3D-реконструкцию коронального магнитного поля, использующую нелинейное бессилое приближение (NLFF) (см., например, [Wheatland et al., 2000; Wiegelmann, 2004, Wiegelmann, Sakurai, 2012]). Такие расчеты опираются на знание полного фотосферного магнитного поля. В NLFF-приближении электрический ток всегда параллелен (или антипараллелен) вектору магнитного поля. Наиболее общим подходом к расчетам поля в рамках этого приближения является оптимизационный метод [Wheatland et al., 2000; Wiegelmann, 2004; Wiegelmann, Inhester, 2010; Rudenko, Dmitrienko, 2020].

Возможная связь изменения E_{free} с появлением КВМ рассматривалась неоднократно. Так, в работе [Metcalf et al., 2002] рассчитывалось изменение E_{free} в АО в период отсутствия в ней солнечных вспышек. Было сделано предположение, что обнаруженное быстрое уменьшение E_{free} связано с генерацией гало-КВМ, хотя такой КВМ не наблюдался в поле зрения коронографов LASCO. Choe, Cheng [2002] рассматривали связь изменения бессилового магнитного поля с генерацией КВМ. DeVore, Antiochos [2005] рассчитали E_{free} для «breakout» модели КВМ [Antiochos, 1998]. Falconer, Moore, Gary [2006], обсуждая магнитные причины КВМ, пришли к выводу о предпочтительности E_{free} по сравнению с магнитным скручиванием (twist). Lin, Kramar, Tomczyk [2019] отметили, что новый подход к нахождению E_{free} , опирающийся на томографические измерения параметров солнечной короны, может использоваться для сравнения E_{free} с измеряемой кинетической энергией КВМ.

Одним из фундаментальных параметров солнечного магнитного поля является магнитная спиральность M_h [Berger, 1999]. Эта характеристика отражает топологические свойства и сложность поля и является количественной характеристикой скрученности силовых линий поля в выбранной пространственной области. Важным является вопрос о происхождении M_h . Pevtsov, Maleev, Longcope [2003] обнаружили связь между изменением M_h и всплыванием молодой АО. Это дает основание предположить, что M_h возникает в АО до ее всплывания.

Различные аспекты связи КВМ с M_h обсуждались неоднократно. Jung et al. [2009] изучили связь скорости КВМ V_{CME} с M_h в областях солнечных источников КВМ. Показано, что M_h позитивно коррелирует с V_{CME} . Zhang [2012] пришел к выводу, что КВМ является результатом накопления магнитной спиральности. Kim et al. [2013] изучили инжекцию магнитной спиральности в АО, производящую множество связанных со вспышками КВМ. В работе Kim et al. [2017] исследована связь V_{CME} и M_h в области источников КВМ на Солнце на ранних фазах 23-го и 24-го солнечных циклов. Pal [2022] обсудил процессы транспортировки магнитной спиральности в магнитный жгут (flux-rope) КВМ.

Тем не менее, до сих пор не удалось связать увеличение энергии КВМ на начальной стадии его

движения с изменениями E_{free} и M_h . Одна из причин этого заключается в том, что практически отсутствуют энергичные КВМ с относительно большой скоростью, не связанные с солнечными вспышками, и очень мало энергичных КВМ, связанных со слабыми рентгеновскими вспышками. В настоящей работе на примере одного энергичного КВМ с относительно большой скоростью, связанного со слабой вспышкой рентгеновского балла C1.2, впервые удалось показать, что при нарастании V_{CME} на начальном этапе движения КВМ E_{free} и M_h заметно уменьшаются. В то же время до начала вспышки и появления КВМ E_{free} и M_h синхронно и относительно быстро увеличиваются. Изменение E_{free} во время ее спада несколько больше оцененной максимальной кинетической энергии КВМ на начальном этапе его движения. Но если предположить, что часть E_{free} трансформируется в энергию магнитного поля КВМ, изменение E_{free} в период начального ускорения КВМ может быть сравнимо с полной энергией КВМ. Подчеркнем, что работа носит дискуссионный характер, так как опирается на предположения, требующие серьезного экспериментального подтверждения.

ДАнные И МЕТОды АНАЛИЗА

Были сформулированы следующие требования к отбору событий для последующего анализа. Отбираются КВМ, зарегистрированные Large Angle Spectrometric Coronagraph (LASCO; [Brueckner et al., 1995]) на борту Solar and Heliospheric Observatory (SOHO; [Domingo et al., 1995]), с относительно большой кинетической энергией, которые сопровождаются очень слабыми рентгеновскими вспышками. Это необходимо для того, чтобы изменение E_{free} определялось главным образом изменением энергии КВМ, а вспышка при этом практически не играла заметной роли. Кроме того, слабые вспышки во время своего развития оказывают небольшое искажающее воздействие на фотосферное магнитное поле. Это обеспечивает более точный расчет E_{free} . Центр АО, в которой возник КВМ, не должен быть удален по долготе от центра солнечного диска более чем на 60° . Это нужно для того, чтобы иметь возможность рассчитывать распределение магнитного поля над АО, в которой возник КВМ, как минимум в пределах ± 1 сут относительно моментов появления КВМ и связанной вспышки. Место возникновения КВМ мы определяли по положению центра связанной с КВМ вспышки. К КВМ, которые удовлетворяют сформулированным выше требованиям, относятся гало-КВМ. Для отбора нужных событий использовались данные каталогов КВМ LASCO CME Catalog [<https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME/>] и LASCO HALO CME Catalog [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/halo/halo.html], описанных в работах Gopalswamy et al. [2009, 2010]. Для поиска нужного КВМ были проанализированы все гало-КВМ за июнь 2010 – декабрь 2023 г. Было отобрано показавшееся нам наиболее оптимальным с точки зрения предлагаемых требований событие 26.11.2011 с КВМ, имеющим кинетическую энергию $5.2 \cdot 10^{31}$ эрг, и солнечной вспышкой рентгеновского балла C1.2. Анализ показал малое количество энергичных КВМ, связанных

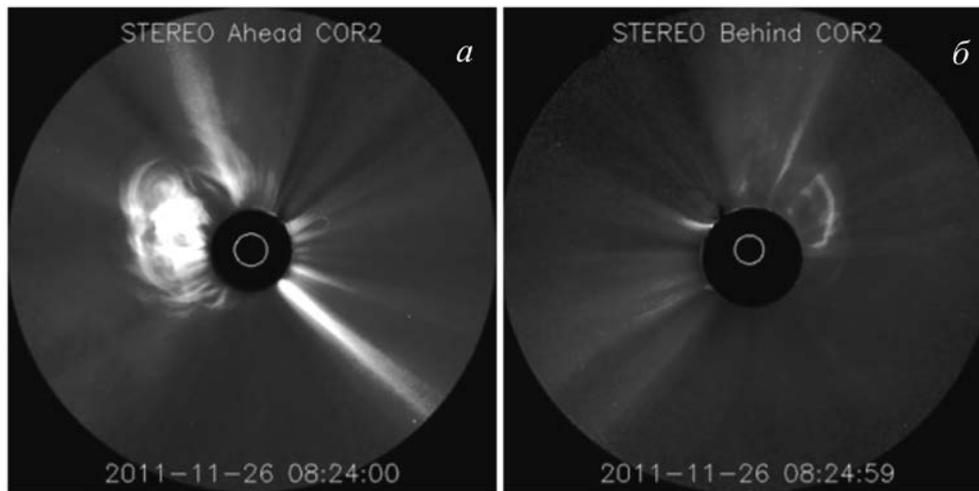


Рис. 1. *a* — КВМ в поле зрения COR2A на борту КА STEREO-A; *б* — КВМ в поле зрения COR2B на борту STEREO-B (каталог [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/stereo/daily_movies/])

со слабыми вспышками. Это неудивительно, так как ранее было показано, что для связи V_{CME} и кинетической энергии КВМ E_{kin} с интенсивностью вспышечного рентгеновского излучения X_{sxr} или баллом вспышек, зарегистрированных космическим аппаратом GOES, характерным является положительный тренд между изменением V_{CME} или E_{kin} с одной стороны и X_{sxr} или баллом вспышек с другой стороны [Maričić et al., 2007; Mahrous et al., 2009; Youssef, 2013; Youssef et al., 2013; Shaltout et al., 2019].

Выделенный КВМ возник в АО NOAA 11353 и впервые был зарегистрирован в поле зрения LASCO C2 26.11.2011 (07:12 UT). КВМ с $E_{\text{kin}}=5.2 \cdot 10^{31}$ эрг был связан с рентгеновской вспышкой балла C1.2. Можно отметить следующие факты, позволяющие считать, что данный КВМ возник именно в этой АО. Во-первых, используя предложенную в работе [Egorov, Fainshtein, 2021] методику, мы показали, что анализируемый КВМ возник на видимой стороне Солнца. Согласно работе [Egorov, Fainshtein, 2021], это означает, что КВМ движется в поле зрения коронографа COR2A на борту КА STEREO-A на восток, а в поле зрения COR2B на борту STEREO-B — на запад. Именно такая ситуация реализована для выбранного КВМ (рис. 1). Во-вторых, именно в этой АО произошла связанная с КВМ солнечная вспышка с координатами N17W49, при этом указанные в каталоге гало-КВМ попадают в эту АО (см. также положение вспышки [<https://solarmonitor.org/>]). В-третьих, расчет направления движения КВМ в 3D-пространстве по данным коронографов COR, В на борту космических аппаратов STEREO-A, -B с использованием метода, предложенного в работе [Egorov, Fainshtein, 2021], показал, что продолжение найденного направления движения КВМ от небольших высот над искусственной луной коронографов до поверхности Солнца попадает в окрестность указанной АО.

Отметим, что, согласно каталогу Near-Earth Interplanetary Coronal Mass Ejections [<https://izw1.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.htm>], корональному выбросу массы, выбранному нами для анализа по данным LASCO C2, на орбите Земли соответствует меж-

планетный КВМ (ICME), которому предшествует межпланетная ударная волна. Воздействие последовательности ударная волна — ICME на магнитосферу Земли сопровождается внезапным началом и генерацией небольшого геомагнитного возмущения.

На рис. 2, *a* показан КВМ в один из моментов его наблюдения в поле зрения LASCO C2, на панели *б* — зависимость солнечного излучения в мягком рентгене.

Для начального периода движения анализируемого КВМ (т. е. до выхода КВМ в поле зрения коронографа LASCO C2) была построена зависимость скорости передней части КВМ (фронтальной структуры) от времени. На рис. 3 крестиками показан передний фрагмент фронтальной структуры КВМ для одного момента времени. Виден ее нижний боковой участок, верхний боковой выделить не удалось. Это означает, что мы смогли показать только южную часть проекции на плоскость неба передней части фронтальной структуры. Возможно, с этим связано движение ее выделенного участка под углом к позиционному углу 270° к югу. Середина внешней границы фронтальной структуры КВМ движется (рис. 2, *a*) в направлении с позиционным углом $\sim 270^\circ$.

Для выделения внешней границы фронтальной структуры КВМ на начальном этапе его движения использовались разностные изображения Солнца в канале 171 \AA , полученные с помощью AIA (Atmospheric Imaging Assembly) [Lemen et al., 2012] на SDO [Pesnell et al., 2012] и подвергнутые предварительной обработке. Она включала нормировку и совмещение изображений. Процедура нормировки заключалась в следующем. На каждом изображении Солнца выделялся участок спокойной области рядом с анализируемой АО и в нем находилась средняя яркость. Затем для изображения Солнца в каждый момент времени среднее значение яркости в спокойной области делилось на такое же в первый момент времени. Далее на полученные коэффициенты умножались значения яркости в каждом пикселе каждого изображения. Вторая процедура включала совмещение изображений, направленное на исключение негативного влияния дифференциального вращения Солнца на определение положения КВМ.

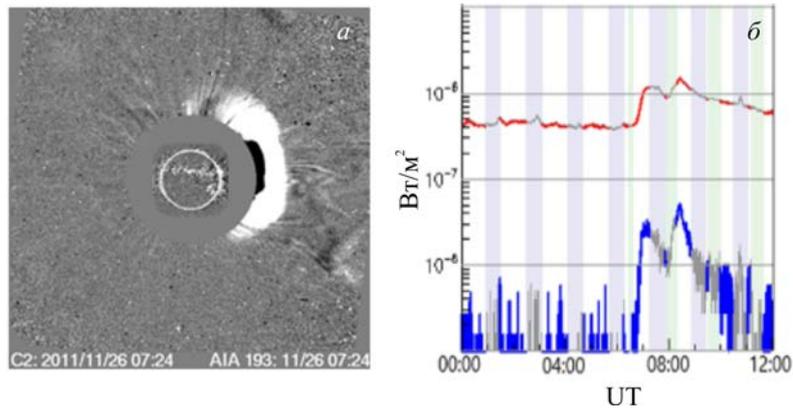


Рис. 2. КВМ в один из моментов его наблюдения в поле зрения LASCO C2 из каталога КВМ [<https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME/>] (а) и GOES X-rays из каталога [<https://sprg.ssl.berkeley.edu/~tohban/browser/>] (б). Красная кривая соответствует диапазону длин волн рентгеновского излучения 1–8 Å, синяя с фрагментами серого цвета — 0.5–4 Å. На вертикальной оси указана интенсивность рентгеновского излучения ($Вт/м^2$) для любого диапазона длин волн

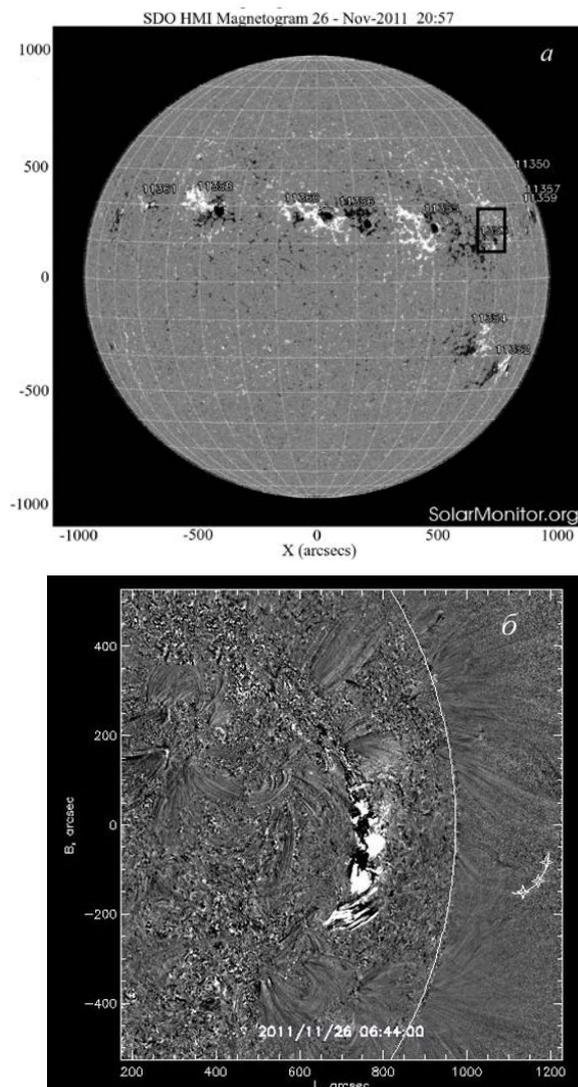


Рис. 3. Магнитограмма магнитного поля, измеренного по лучу зрения с нанесенным основанием расчетного для свободной магнитной энергии бокса — черный прямоугольник (а). Для удобства нанесения основания расчетного бокса мы воспользовались магнитограммой (20:57 UT) [<https://solarmonitor.org>] (б). Пример выделения переднего фронта КВМ (крестики) для момента времени 06:44:00 UT

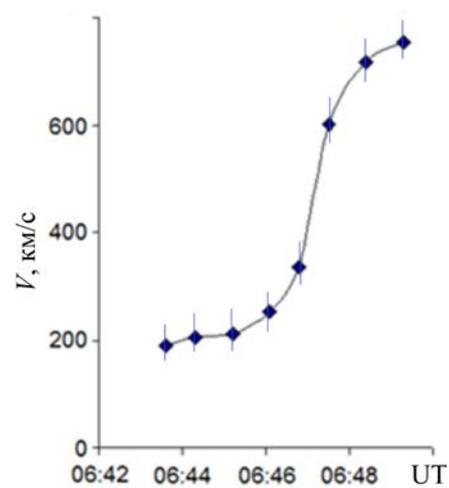


Рис. 4. Зависимость скорости КВМ от времени на начальном этапе движения. Бары ошибок оценены из предполагаемой формы фронтальной структуры, имеющей маленькую кривизну

Изменение скорости КВМ на начальном этапе движения показано на рис. 4, ее удалось определить только при движении КВМ над солнечным лимбом.

Свободная магнитная энергия рассчитывалась по векторным измерениям фотосферного магнитного поля инструментом Helioseismic and Magnetic Imager (HMI; [Scherrer et al., 2012]) с использованием подходов, изложенных в работе [Rudenko, Dmitrienko, 2020]. В ней представлен метод постобработки, который устраняет неизбежную несоленоидальность магнитного поля, вычисляемую кодами класса оптимизации, которая вызвана заметной ролью градиента давления газа в балансе сил на фотосферных высотах, а также некоторыми математическими свойствами процедуры оптимизации и связанной с ней краевой задачи. Постобработка преобразует всю несоленоидальную часть магнитного поля в соленоидальное поле.

Энергия магнитного поля в расчетном боксе объемом \tilde{V}

$$E_{\text{mag}} = \frac{1}{8\pi} \int_0^{\tilde{V}} \mathbf{B}^2 dv. \quad (1)$$

Энергия потенциального поля

$$E_{\text{pot}} = \frac{1}{8\pi} \int_0^{\bar{v}} \mathbf{B}_{\text{pot}}^2 dv. \quad (2)$$

Свободная магнитная энергия

$$E_{\text{free}} = E_{\text{mag}} - E_{\text{pot}}. \quad (3)$$

Магнитная спиральность M_h в расчетном боксе над АО определялась методом, описанным в работе [Rudenko, Myshyakov, 2011], в которой дан алгоритм расчета калибровочно-инвариантной спиральности магнитного поля, заданного в прямоугольном боксе. Алгоритм был проверен и подтвержден на хорошо известной полуаналитической модели бессилового поля [Low, Lou, 1990], которую авторы переформулировали в терминах векторного потенциала.

Использовались следующие соотношения:

$$M_h = \int_0^{\bar{v}} (\mathbf{A} - \mathbf{A}_{\text{pot}}) (\mathbf{B} - \mathbf{B}_{\text{pot}}) dv, \quad (4)$$

$$\mathbf{A} - \mathbf{A}_{\text{pot}} = -\frac{1}{4\pi} \int_0^{\bar{v}} (\mathbf{r} - \mathbf{r}') / |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3 \mathbf{B}(\mathbf{r}') - B_{\text{pot}}(\mathbf{r}') dv'. \quad (5)$$

Вектор \mathbf{A}_{pot} рассчитывался в прямоугольном боксе методом, предложенным в [Rudenko, Myshyakov, 2011].

$$\mathbf{B}_{\text{pot}} = \nabla \times \mathbf{A}_{\text{pot}}. \quad (6)$$

Магнитное поле \mathbf{B}_{pot} выбиралось таким образом, что нормальная компонента поля \mathbf{B} на границе расчетного бокса $S_{\bar{v}}$ удовлетворяла условию

$$(\mathbf{n} \cdot \mathbf{B})_{S_{\bar{v}}} = (\mathbf{n} \cdot \mathbf{B}_{\text{pot}})_{S_{\bar{v}}}. \quad (7)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 5 показано изменение E_{free} в расчетном боксе над АО NOAA 11353. Размер стороны основания бокса составил 12° , высота бокса $0.22R_s$ (R_s — радиус Солнца). До $\sim 06:25$ UT E_{free} почти не меняется на фоне относительно небольших колебаний, затем наблюдается ее резкий рост, сопровождающийся резким уменьшением, и далее последовательно наблюдаются рост, а затем уменьшение E_{free} . Первый рост E_{free} связан, возможно, с появившимся 25.11.2011 в $\sim 17:00$ UT и затем эволюционирующим новым всплывающим магнитным потоком (НВМП). Этот НВМП завершился 26.11.2011 в $\sim 07:00$ UT. Наличие НВМП АО NOAA 11353 в указанный промежуток времени отмечается, например, в пакете программ Helioviewer [https://gs671-suske.ndc.nasa.gov]. Этот НВМП был, возможно, драйвером небольшой рентгеновской вспышки, начало которой близко к началу первого уменьшения E_{free} , а также появления КВМ, который мы исследуем.

Мы оценили моменты времени $t_{1\text{free}}$ и $t_{2\text{free}}$ начала и конца первого спада E_{free} (см. рис. 5). Оказалось, что $t_{1\text{free}} = 6$ ч 36 мин, $t_{2\text{free}} = 6$ ч 48 мин. Отсюда следует, что $\Delta t_{\text{free}} = t_{2\text{free}} - t_{1\text{free}} = 12$ мин. Для сравнения мы оценили также моменты $t_{1\text{CME}}$ и $t_{2\text{CME}}$ начала и завершения быстрого ускорения КВМ на начальном этапе его движения. Момент $t_{1\text{CME}}$ мы определили,

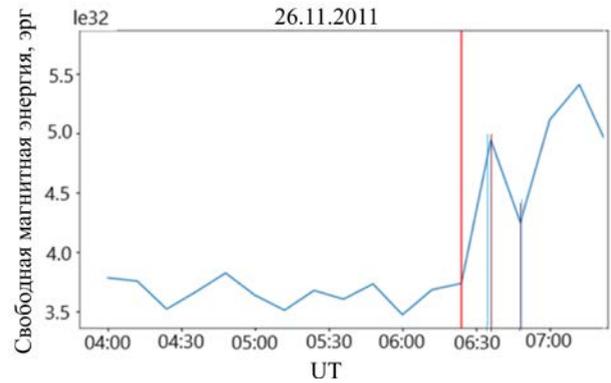


Рис. 5. Изменение E_{free} в расчетном боксе над АО NOAA 11353. Левая красная вертикальная линия — начало резкого увеличения E_{free} ; тонкие красные вертикальные линии — начало и конец спада E_{free} ; тонкие синие вертикальные линии — начало и конец набора скорости КВМ на начальном этапе его движения

продолжив в виде прямой линии отрезок (см. рис. 4) между первыми двумя точками до пересечения этой линии с горизонтальной осью времени. Соответствующий этой точке момент времени принимался за $t_{1\text{CME}}$. В качестве $t_{2\text{CME}}$ принимался момент времени, соответствующий последней точке на рис. 4. Были получены следующие значения $t_{1\text{CME}}$ и $t_{2\text{CME}}$: $t_{1\text{CME}} \approx 6$ ч 34 мин, $t_{2\text{CME}} \approx 6$ ч 49 мин. Отсюда следует, что $\Delta t_{\text{CME}} = t_{2\text{CME}} - t_{1\text{CME}} \approx 15$ мин. Учитывая временное разрешение 12 мин измерения векторного фотосферного магнитного поля, использовавшегося для расчетов свободной энергии, а также погрешность оценки $t_{1\text{CME}}$, можно считать, что имеется хорошее согласие между началом и концом спада E_{free} и началом и концом быстрого ускорения КВМ на начальном этапе его движения. Соответственно близкими оказались промежутки времени $\Delta t_{E_{\text{free}}}$ и Δt_{CME} спада E_{free} и быстрого нарастания скорости (кинетической энергии) КВМ.

Изменение E_{free} между началом и концом ее спада $\sim 7.26 \cdot 10^{31}$ эрг. Максимальная кинетическая энергия КВМ на начальном этапе его движения равна или немного меньше $3.47 \cdot 10^{31}$ эрг, если предполагать, что масса КВМ в конце его начальной стадии движения такая же, как и в каталоге КВМ, или немного меньше. Эта оценка E_{kin} сделана, как и в каталоге КВМ [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/], с использованием проекционной скорости. В данном случае это проекция скорости на плоскость неба телескопа, регистрирующего Солнце в канале 171 \AA . Более точной оценкой E_{kin} будет ее нахождение с использованием скорости в 3D-пространстве. Используя ее отношение к линейной проекционной скорости V_{3D}/V_{lin} для нашего события из каталога гало-КВМ, умножим полученную выше максимальную кинетическую энергию на $(V_{3D}/V_{\text{lin}})^2$. В результате получим более реалистичное значение $E_{\text{kin}} \leq 4.08 \cdot 10^{31}$ эрг в конце начального этапа движения КВМ. Указанное несоответствие между уменьшением E_{free} и максимальной кинетической энергией на начальном этапе движения КВМ связано, скорее всего, с тем, что кроме кинетической энергии, КВМ получает магнитную энергию, что также нужно компенсировать уменьше-

нием исходной E_{free} . Небольшая ее часть уйдет на начальный этап развития вспышки. По величине изменения E_{free} во время ее первого уменьшения и оцененной E_{kin} на начальном этапе движения КВМ можно определить вероятную магнитную энергию КВМ $3.18 \cdot 10^{31}$ эрг. Вопрос о механизмах трансформации E_{free} в энергию магнитного поля КВМ, насколько нам известно, остается открытым.

С учетом того, что масса КВМ находится с большой погрешностью и может меняться по мере удаления КВМ от поверхности Солнца (см., например, [Vourlidas et al., 2000; Bein et al., 2013]), вызывает удивление, что оцененная нами E_{kin} оказалась сравнима с изменением E_{free} в начальный период движения КВМ.

Насколько обосновано использовать массу, приведенную в каталоге [<https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME>], в расчетах E_{kin} на начальном этапе движения КВМ? В ряде работ (см., например, [Vourlidas et al., 2000; Bein et al., 2013]) показано, что масса КВМ немного уменьшается при меньших удалениях КВМ от искусственной Луны коронографа. Поэтому мы отметили возможность того, что реальная масса может быть меньше выбранной нами. Хотя специалистам хорошо известно, что масса КВМ находится с большой погрешностью, ее используют для оценки E_{kin} и потенциальной энергии КВМ в поле тяжести Солнца, а также для оценки сил, действующих на КВМ. Поскольку о массе КВМ и ее изменении вблизи поверхности Солнца практически ничего не известно (см. [Bein et al., 2013], где сделана оценка депроцированной массы КВМ на высотах, меньших $3R_s$), других вариантов, как использовать массу, приведенную в каталоге КВМ, у нас не было. Наши оценки допустимы при уменьшении выбранной массы примерно до двух раз. Возросшую при этом разность E_{free} и E_{kin} можно отнести к энергии магнитного поля КВМ, которая, может быть больше E_{kin} .

Таким образом, из наблюдений следует, что время быстрого нарастания скорости КВМ после его возникновения примерно совпадает со временем уменьшения E_{free} от максимального значения до прекращения спада. Вполне разумные оценки максимальной кинетической энергии КВМ в период быстрого нарастания его скорости показали, что изменение E_{free} в период ее первого спада (см. рис. 5) примерно совпадает с суммой максимальной кинетической энергии КВМ в период резкого нарастания его скорости и ожидаемой энергии магнитного поля в КВМ в конце нарастания его скорости.

Тем не менее, отметим следующее. Оказалось, что для нескольких моментов времени, для которых была измерена скорость КВМ (см. рис. 4), фронтальная структура оказалась выше, чем высота бокса, в котором рассчитывалась E_{free} . Как это может повлиять на полученные результаты? Попробуем оценить, как будет выглядеть зависимость $E_{free}(t)$ в случае, если высота расчетного бокса включает все точки измеренной V_{CME} , т. е. увеличивается. Если уменьшение E_{free} действительно совпадает с изменением энергии КВМ на начальном этапе его движения, начало и конец спада $E_{free}(t)$ не изменятся, так

как они определяются началом и концом набора скорости КВМ на начальном этапе движения. В то же время начало и конец спада $E_{free}(t)$ поднимутся, но на небольшую высоту, так как с высотой плотность $E_{free}(t)$ уменьшается. Если мы не ошиблись в оценке полной энергии КВМ на начальном этапе его движения, величина спада $E_{free}(t)$ не изменится, но спад будет начинаться и заканчиваться на других значениях $E_{free}(t)$. Если мы ошиблись в оценке полной энергии КВМ на начальном этапе его движения, занизив энергию магнитного поля КВМ, начало спада $E_{free}(t)$ уйдет на большую высоту. Но вся методика анализа данных останется прежней. Таким образом, выход точек измерения скорости КВМ за пределы расчетной области может привести к занижению энергии магнитного поля КВМ, но не затронет моменты начала и конца спада $E_{free}(t)$ при изменении высоты бокса для расчета $E_{free}(t)$.

Близость оцененного времени достижения максимальной скорости КВМ на начальном этапе его движения к временному разрешению (12 мин) векторных измерений магнитного поля инструментом НМІ может показаться странной, что ставит под сомнение надежность полученных результатов. В действительности это вполне возможное время достижения КВМ максимальной скорости на начальном этапе его движения. Это подтверждают неоднократные измерения зависимости $V_{CME}(t)$ после возникновения КВМ (см., например, зависимости $V_{CME}(t)$ [Temmer et al., 2010]). Для события 03.06.2007 время резкого нарастания V_{CME} до максимального значения $dT \sim 8$ мин, а для события 31.12.2007 $dT \sim 13$ мин.

Есть события, для которых рассчитанное время изменения E_{free} во время солнечной вспышки практически точно совпадает с временным разрешением векторных измерений магнитного поля магнитометром НМІ. Это показано, например, для двух мощных рентгеновских вспышек, зарегистрированных 06.09.2017 ([McKevitt et al., 2024], см. рис. 3). Для приведенного ниже события 24.10.2014 (рис. 6) полное время изменения E_{free} составило 36 мин, но основное изменение E_{free} происходит в течение 12 мин.

Заметим, что нарастание E_{free} в АО перед эруптивными процессами (вспышки, КВМ) достаточно распространено. При этом временные масштабы такого нарастания варьируют в широких пределах. Это пока-

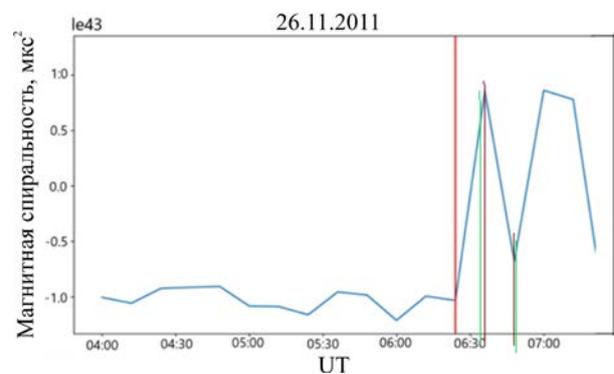


Рис. 6. Изменение магнитной спиральности во времени для события 26.11.2011. Вертикальные линии те же, что на рис. 5

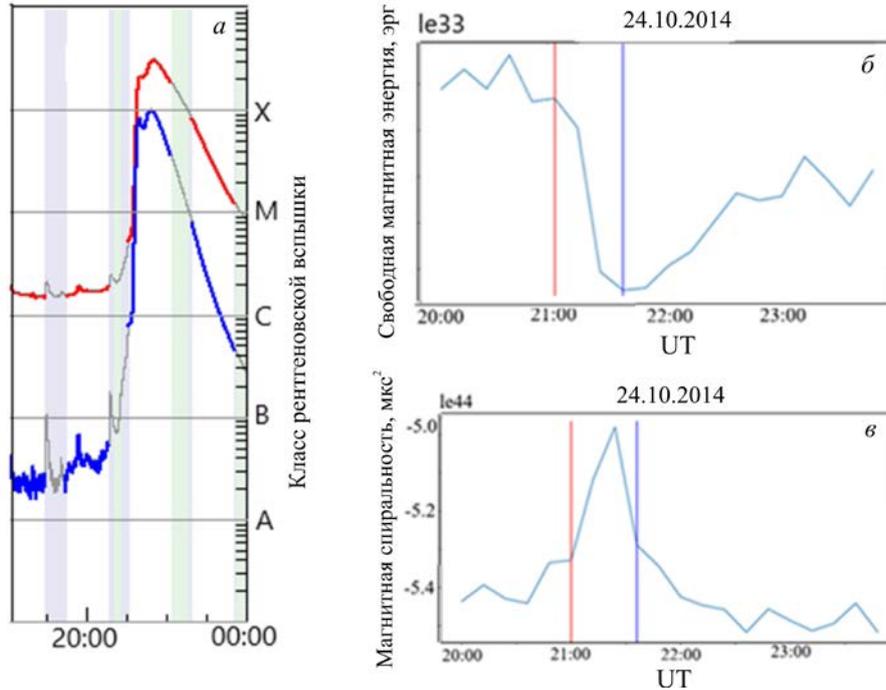


Рис. 7. Интенсивность мягкого рентгеновского излучения (а) во время солнечной вспышки X3.1 из каталога [<https://sprg.ssl.berkeley.edu/~tohban/browser/>] (верхняя линия — диапазон длин волн 1–8 Å, нижняя линия — 0.5–4 Å); б — изменение $E_{\text{free}}(t)$; в — изменение $M_h(t)$. Левой вертикальной линией показано начало спада E_{free} , близкое к началу роста интенсивности всплывающего излучения. Правая вертикальная линия — время, близкое к моменту прекращения спада E_{free}

зано, например, в работе [Sun et al., 2012] для события 15.02.2011: время быстрого нарастания составило ~2–3 ч, а затем последовало медленное нарастание в течение ~2 сут. Это событие характеризуется вспышкой с рентгеновским баллом X2.2 и КВМ с $E_{\text{kin}}=9.7 \cdot 10^{30}$ эрг., т. е. это случай с сильной вспышкой и относительно слабым КВМ. В работе [McKevitt et al., 2024] приведено изменение E_{free} , сопровождающее два эруптивных события 06.09.2017. В первом событии зарегистрирована вспышка с рентгеновским баллом X2.2 и слабым КВМ, во втором событии — мощная вспышка X9.3 и достаточно мощный КВМ с $E_{\text{kin}}=3.6 \cdot 10^{32}$ эрг. Перед первым событием E_{free} нарастала как минимум 3 ч (весь интервал изменения E_{free} перед началом ее спада авторам цитируемой статьи показать не удалось), перед вторым — ~3 ч. Быстрое нарастание E_{free} за несколько минут в нашем случае связано, скорее всего, с особенностями поведения НВМП.

Попробуем объяснить особенности поведения E_{free} после завершения ее первого спада. Ясно, что изменение $E_{\text{free}}(t)$ в этот промежуток времени слабо отражает эволюцию КВМ. Согласно каталогу [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/halo/halo.html], после резкого начального ускорения $V_{\text{CME}}(t)$ меняется довольно медленно. Значит, и кинетическая энергия меняется медленно, без резких изменений, которые могли бы объяснить второй резкий спад $E_{\text{free}}(t)$. Резкий рост $E_{\text{free}}(t)$ после ее первого спада можно связать с продолжением действия НВМП, который прекращается в ~07:00 UT, и слабым потреблением свободной энергии вспышкой и КВМ в этот период.

После этого $E_{\text{free}}(t)$ еще продолжает расти в течение ~12 мин, но с меньшей быстротой. Последующий спад E_{free} отражает прекращение действия нового всплывающего магнитного потока, $E_{\text{free}}(t)$ уменьшается примерно до значения в начале роста V_{CME} (первый максимум $E_{\text{free}}(t)$).

На рис. 6 показано изменение $M_h(t)$ для события 26.11.2011. Обращает на себя внимание соответствие между характером изменения $E_{\text{free}}(t)$ и $M_h(t)$: рост $E_{\text{free}}(t)$ сопровождается ростом $M_h(t)$ и наоборот. Слабое изменение $E_{\text{free}}(t)$ перед началом ее первого увеличения сопровождается слабым изменением $M_h(t)$.

Заметим, что такое соответствие между поведением $E_{\text{free}}(t)$ и $M_h(t)$ не является характерным для всех эруптивных событий. На рис. 7, а показана мощная вспышка, возникшая 24.10.2014, на рис. 6, б — изменение $E_{\text{free}}(t)$ для эруптивного события 24.10.2014, представляющего солнечную вспышку X3.1, не связанную с КВМ. Различные аспекты этого события и нескольких других аналогичных (мощная рентгеновская вспышка, не связанная с КВМ) подробно рассмотрены в [Thalmann et al., 2015]. На рис. 7, в показано изменение $M_h(t)$ для этого события. Видно, что в период самого быстрого уменьшения $E_{\text{free}}(t)$ $M_h(t)$ увеличивается. До начала и после окончания эруптивного события в среднем $E_{\text{free}}(t)$ и $M_h(t)$ меняются со временем в противофазе.

То, что $E_{\text{free}}(t)$ и $M_h(t)$ могут меняться синхронно, было показано для эруптивного события 07.06.2011 [Egorov et al., 2020]. Оно включало мощный КВМ с $E_{\text{kin}}=1.8 \cdot 10^{32}$ эрг, не очень мощную вспышку M2.5

и эрупцию относительно большого волокна. Сравнение изменения $E_{\text{free}}(t)$ и $M_h(t)$ (см. рис. 7, 12 верхняя и нижняя правые панели в цитируемой работе) для участка АО, где наиболее сильно менялось магнитное поле во время эруптивного события, обнаруживает схожесть характера изменения $E_{\text{free}}(t)$ и $M_h(t)$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Возникновение КВМ — это быстропротекающий процесс в нижней короне Солнца, сопровождающийся выделением большого количества энергии, которая может достигать $(2\div 3) \cdot 10^{25}$ Дж. Неоднократно высказывалось предположение, что источником этой энергии является свободная магнитная энергия E_{free} , накопленная в активной области, в которой возник КВМ. Но убедительно показать это до сих пор не удавалось. Одна из причин этого — сопровождение КВМ солнечными вспышками, которые сами по себе сопровождаются уменьшением E_{free} . Отделить изменение E_{free} , связанной с возникновением КВМ, от изменения E_{free} , связанной с солнечной вспышкой, во многих случаях не удается. Чтобы осуществить такое отделение, нужно выбрать относительно мощный по кинетической энергии E_{kin} КВМ, связанный с очень слабой вспышкой. Но отобрать такое событие довольно сложно, так как в среднем с ростом E_{kin} КВМ интенсивность мягкого рентгеновского излучения связанной вспышки растет. Нам удалось обнаружить одно событие за 2010–2023 гг., удовлетворяющее этому требованию. Был выбран гало-КВМ с относительно большой $E_{\text{kin}} = 5.2 \cdot 10^{31}$ эрг, связанный со слабой рентгеновской вспышкой C1.2. КВМ впервые был зарегистрирован в поле зрения коронографа LASCO C2 26.11.2011 (07:12 UT). Мы предположили, что драйвером этого КВМ и вспышки является наблюдавшееся всплытие нового магнитного потока.

Мы показали, что нарастание скорости КВМ на начальном этапе его движения практически совпадает по времени с уменьшением $E_{\text{free}}(t)$, т. е. начинается рост скорости КВМ примерно в момент начала спада E_{free} , а заканчивается примерно в момент завершения ее спада. Изменение полной энергии КВМ при этом близко по оценкам к изменению $E_{\text{free}}(t)$ во время ее спада.

Для рассмотренного события мы сопоставили характер поведения $E_{\text{free}}(t)$ и $M_h(t)$. Оказалось, что изменения $E_{\text{free}}(t)$ и $M_h(t)$ характеризуются одинаковыми трендами: рост $E_{\text{free}}(t)$ сопровождается ростом $M_h(t)$ и наоборот. Такая тенденция не является обязательным трендом для всех эруптивных событий. Мы сравнили поведение $E_{\text{free}}(t)$ и $M_h(t)$ для эруптивного события, которое представляло мощную рентгеновскую вспышку X3.1, не связанную с КВМ. Вспышка была зарегистрирована 24.10.2014. Для такого события $E_{\text{free}}(t)$ и $M_h(t)$ в период максимально быстрого уменьшения E_{free} , а также до и после эруптивного события меняются в среднем противоположным образом: если $E_{\text{free}}(t)$ уменьшается, то $M_h(t)$ растет и наоборот.

При анализе выбранного события пришлось сделать несколько предположений. Например, мы счи-

тали, что масса КВМ в конце начального этапа его движения равна или несколько меньше массы, приведенной в каталоге КВМ. Мы также предположили, что уменьшение $E_{\text{free}}(t)$ в расчетном боксе может быть связано с изменением скорости КВМ и в том случае, когда он оказывается над расчетным боксом на относительно небольшой высоте. Все это стимулирует продолжение исследований, направленных на выяснение связи изменений $E_{\text{free}}(t)$ и V_{CME} на начальном этапе движения КВМ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и Высшего образования РФ.

Авторы работы благодарят команды LASCO/SOHO, HMI/SDO, AIA/SDO, STEREO COR2A, COR2B, GOES за возможность свободного использования данных этих инструментов. Мы выражаем также благодарность создателям каталогов [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/index.html] и [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/halo/halo.html] за возможность использования приведенных в них данных. Руденко Г.В. выражает благодарность Иркутскому суперкомпьютерному центру СО РАН за обеспечение доступа к НПС-кластеру «Академик В.М. Матросов» (Иркутский суперкомпьютерный центр СО РАН, ИДСТУ СО РАН [<http://hpc.icc.ru>])

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Antiochos S.K. The Magnetic Topology of Solar Eruptions. *Astrophys. J.* 1998, vol. 502, iss. 2, pp. L181–L184. DOI: [10.1086/311507](https://doi.org/10.1086/311507).
- Baker D.N., Balstad, R., Bodeau, J.M. and 15 more co-authors. *Severe Space Weather Events — Understanding Social and Economic Impacts: A Workshop Rep.* The National Academies Press, Washington DC. 2008.
- Bein B.M., Temmer M., Vourlidis A., et al. The height evolution of the “true” coronal mass ejection mass derived from stereo COR1 and COR2 observations. *Astrophys. J.* 2013, vol. 768:31, 12 p. DOI: [10.1088/0004-637X/768/1/31](https://doi.org/10.1088/0004-637X/768/1/31).
- Berger M.A. Introduction to magnetic helicity. *Plasma Physics and Controlled Fusion.* 1999, vol. 41, pp. B167–B175. DOI: [10.1088/0741-3335/41/12B/312](https://doi.org/10.1088/0741-3335/41/12B/312).
- Brueckner G.E., Howard R.A., Koomen M.J., et al. The Large Angle Spectroscopic Coronagraph (LASCO). *Solar Phys.* 1995, vol. 162, pp. 357–402. DOI: [10.1007/BF00733434](https://doi.org/10.1007/BF00733434).
- Choe G.S., Cheng C.Z. Energy of Force-free Magnetic Fields in Relation to Coronal Mass Ejections. *Astrophys. J.* 2002, vol. 574, iss. 2, pp. L179–L182. DOI: [10.1086/342478](https://doi.org/10.1086/342478).
- DeVore R.C., Spiro A.K. Magnetic Free Energies of Breakout Coronal Mass Ejections. *Astrophys. J.* 2005, vol. 628, iss. 2, pp. 1031–1045. DOI: [10.1086/431141](https://doi.org/10.1086/431141).
- Domingo V., Fleck B., Poland A.I. The SOHO mission: an overview. *Solar Phys.* 1995, vol. 162, pp. 1–37. DOI: [10.1007/BF00733425](https://doi.org/10.1007/BF00733425).
- Egorov Ya.I., Fainshtein V.G. A simple technique for identifying the propagation direction of CME in a 3^d space. *Solar Phys.* 2021, vol. 296, iss. 11, article id. 161. DOI: [10.1007/s11207-021-01904-3](https://doi.org/10.1007/s11207-021-01904-3).
- Egorov Y.I., Fainshtein V.G., Myshyakov I.I., et al. Studying magnetic field variations accompanying the 2011 June 7 eruptive event, by using nonlinear force-free field modeling. *Solar Phys.* 2020, vol. 295, iss. 4, article id. 52. DOI: [10.1007/s11207-020-01613-3](https://doi.org/10.1007/s11207-020-01613-3).
- Falconer D.A., Moore R.L., Gary G.A. Magnetic causes of solar coronal mass ejections: dominance of the free magnetic energy over the magnetic twist alone. *Astrophys. J.* 2006, vol. 644, iss. 2, pp. 1258–1272. DOI: [10.1086/503699](https://doi.org/10.1086/503699).

- Forbes T.G. A review on the genesis of coronal mass ejections. *J. Geophys. Res.* 2000, vol. 105, pp. 23153–23166. DOI: [10.1029/2000JA000005](https://doi.org/10.1029/2000JA000005).
- Gopalswamy N. History and development of coronal mass ejections as a key player in solar terrestrial relationship. *Geoscience Lett.* 2016, vol. 3, article id. 8, 18 p. DOI: [10.1186/s40562-016-0039-2](https://doi.org/10.1186/s40562-016-0039-2).
- Gopalswamy N., Yashiro S., Michalek G., et al. The SOHO/LASCO CME catalog. *Earth, Moon, and Planets.* 2009, vol. 104, pp. 295–313. DOI: [10.1007/s11038-008-9282-7](https://doi.org/10.1007/s11038-008-9282-7).
- Gopalswamy N., Yashiro S., Michalek G., et al. A catalog of halo coronal mass ejections from SOHO. *Sun and Geosphere.* 2010, vol. 5, pp. 7–16.
- Howard T. Coronal Mass Ejections: An Introduction. *Astrophysics and Space Science Library.* 2011, vol. 376. Springer Science+Business Media, LLC, DOI: [10.1007/978-1-4419-8789-1](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8789-1).
- Jung H., Gopalswamy N., Akiyama S., Yashiro S. Relation between magnetic helicity and CME speed in source active regions. *American Geophysical Union, Fall Meeting.* 2009, abstract id.SH41B-1669.
- Kim R.-S., Park S.-H., Jang S., et al. Relation of CME speed and magnetic helicity in CME source regions on the Sun during the early phase of solar cycles 23 and 24. *Solar Phys.* 2017, vol. 292, iss. 4, article id. 66, 14 p. DOI: [10.1007/s11207-017-1079-2](https://doi.org/10.1007/s11207-017-1079-2).
- Klimchuk J.A. *Space Weather (Geophysical Monograph 125)*. Washington: American Geophys. Union, 2001, 143 p. DOI: [10.1029/GM125p0143](https://doi.org/10.1029/GM125p0143).
- Lemen J.R., Title A.M., Akin D.J., et al. The Atmospheric Imaging Assembly (AIA) on the Solar Dynamics Observatory (SDO). *Solar Phys.* 2012, vol. 275, pp. 17–40. DOI: [10.1007/s11207-011-9776-8](https://doi.org/10.1007/s11207-011-9776-8).
- Lin H., Kramar M., Tomczyk S. Tomographic measurements of magnetic free energy in CME source regions. *American Geophysical Union, Fall Meeting 2019*. Abstract #SH53B-3378. 2019.
- Low B.C., Lou Y.Q. Modeling solar force-free magnetic fields. *Astrophys. J.* 1990, vol. 352, p. 343. DOI: [10.1086/168541](https://doi.org/10.1086/168541).
- Mahrous A., Shaltout M., Beheary M.M., et al. CME–flare association during the 23rd solar cycle. *Adv. Space Res.* 2009, vol. 43, iss. 7, pp. 1032–1035. DOI: [10.1016/j.asr.2009.01.028](https://doi.org/10.1016/j.asr.2009.01.028).
- Maričić D., Vršnak B., Stanger A.L., et al. Acceleration phase of coronal mass ejections: II. Synchronization of the energy release in the associated flare. *Solar Phys.* 2007, vol. 241, pp. 99–112. DOI: [10.1007/s11207-007-0291-x](https://doi.org/10.1007/s11207-007-0291-x).
- Metcalf T.R., Mickey D.L., Labonte B.J., Ryder L.A. The Magnetic free energy and a CME in active region 8299. 2002. *Multi-Wavelength Observations of Coronal Structure and Dynamics — Yokoh 10th Anniversary Meeting, Proc. September 17–20, 2001, Hawaii, USA*. Published by Elsevier Science on behalf of COSPAR in the COSPAR Colloquia Ser. P. 249.
- McKevitt J., Jarolim R., Matthews S., et al. The link between non-thermal velocity and free magnetic energy in solar flares. *Astrophys. J. Lett.* 2024, vol. 961, iss. 2, id. L29, 7 p. DOI: [10.3847/2041-8213/ad1bee](https://doi.org/10.3847/2041-8213/ad1bee).
- Pal Sanchita. Uncovering the process that transports magnetic helicity to coronal mass ejection flux ropes. *Adv. Space Res.* 2022, vol. 70, iss. 6, pp. 1601–1613. DOI: [10.1016/j.asr.2021.11.013](https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.11.013).
- Pesnell W.D., Thompson B.J., Chamberlin P.C. The Solar Dynamics Observatory (SDO). *Solar Phys.* 2012, vol. 275, pp. 3–15. DOI: [10.1007/s11207-011-9841-3](https://doi.org/10.1007/s11207-011-9841-3).
- Pevtsov A.A., Maleev V.M., Longcope D.W. Helicity evolution in emerging active regions. *Astrophys. J.* 2003, vol. 593, pp. 1217–1225. DOI: [10.1086/376733](https://doi.org/10.1086/376733).
- Rudenko G.V., Myshyakov I.I. Gauge-invariant helicity for force-free magnetic fields in a rectangular box. *Solar Phys.* 2011, vol. 270, iss. 1, article id. 165. DOI: [10.1007/s11207-011-9743-4](https://doi.org/10.1007/s11207-011-9743-4).
- Rudenko G.V., Dmitrienko I.S. Validity of nonlinear force-free field optimization reconstruction. *Solar Phys.* 2020, vol. 295, iss. 6, article id. 85. DOI: [10.1007/s11207-020-01647-7](https://doi.org/10.1007/s11207-020-01647-7).
- Scherrer P.H., Schou J., Bush R.I., et al. The Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) investigation for the Solar Dynamics Observatory (SDO). *Solar Phys.* 2012, vol. 275, pp. 207–227. DOI: [10.1007/s11207-011-9834-2](https://doi.org/10.1007/s11207-011-9834-2).
- Shaltout Abdelrazek M.K., Amin Eid A., Beheary M.M., Hamid R.H. A statistical study of CME-associated flare during the solar cycle 24. *Adv. Space Res.* 2019, vol. 63, pp. 2300–2311. DOI: [10.1016/j.asr.2018.12.022](https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.12.022).
- Sun X., Hoeksema J.T., Liu Y., et al. Evolution of magnetic field and energy in a major eruptive active region based on SDO/HMI observation. *Astrophys. J.*, 2012, vol. 748, article id. 77, 15 p.
- Sung-Hong Park, Kanya Kusano, Kyung-Suk Cho, Jongchul Chae, Su-Chan Bong, Pankaj Kumar, et al. Study of magnetic helicity injection in the active region NOAA 9236 producing multiple flare-associated coronal mass ejection events. *Astrophys. J.*, 2013, vol. 778, iss. 1, article id. 13, 8 p.
- Temmer M., Veronig A.M., Kontar E.P., et al. Combined STEREO/RHESSI study of coronal mass ejection acceleration and particle acceleration in solar flares. *Astrophys. J.* 2010, vol. 712, no. 2, pp. 1410–1420. DOI: [10.1088/0004-637X/712/2/1410](https://doi.org/10.1088/0004-637X/712/2/1410).
- Thalmann J.K., Su, Y. Temmer M., Veronig A.M. The confined X-class flares of solar active region 2192. *Astrophys. J. Lett.* 2015, vol. 801, no. L23, 5 p. DOI: [10.1088/2041-8205/801/2/L23](https://doi.org/10.1088/2041-8205/801/2/L23).
- Vourlidis A., Subramanian P., Dere K.P., Howard R.A. Large-angle spectrometric coronagraph measurements of the energetics of coronal mass ejections. *Astrophys. J.* 2000, vol. 534, pp. 456–467. DOI: [10.1086/308747](https://doi.org/10.1086/308747).
- Webb D.F., Howard T.A. Coronal mass ejections: Observations. *Living Rev. in Solar Phys.* 2012, vol. 9, iss. 1, article id. 3, 83 p. DOI: [10.12942/lrsp-2012-3](https://doi.org/10.12942/lrsp-2012-3).
- Wheatland M.S., Sturrock P.A., Roumeliotis G. An optimization approach to reconstructing force-free fields. *Astrophys. J.* 2000, vol. 540, pp. 1150–1155. DOI: [10.1086/309355](https://doi.org/10.1086/309355).
- Wiegelmann T. Optimization code with weighting function for the reconstruction of coronal magnetic fields. *Solar Phys.* 2004, vol. 219, pp. 87–108. DOI: [10.1023/B:SOLA.0000021799.39465.36](https://doi.org/10.1023/B:SOLA.0000021799.39465.36).
- Wiegelmann T., Inhester B. How to deal with measurement errors and lacking data in nonlinear force-free coronal magnetic field modelling? *Astron. Astrophys.* 2010, vol. 516, id. A107, 5 p. DOI: [10.1051/0004-6361/201014391](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201014391).
- Wiegelmann T., Sakurai T. Solar force-free magnetic fields. *Living Rev. Solar Phys.* 2012, vol. 9, article id. 5, 49 p. DOI: [10.12942/lrsp-2012-5](https://doi.org/10.12942/lrsp-2012-5).
- Youssef M. Statistical study of the CME solar flares associated events. *Earth, Moon, and Planets.* 2013, vol. 110, pp. 185–105. DOI: [10.1007/s11038-013-9419-1](https://doi.org/10.1007/s11038-013-9419-1).
- Youssef M., Mawad R., Shaltout Mosalam. A statistical study of post-flare associated CME events. *Adv. Space Res.* 2013, vol. 51, pp. 1221–1229. DOI: [10.1016/j.asr.2012.10.007](https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.10.007).
- Zhang M. Coronal mass ejection as a result of magnetic helicity accumulation. *Hinode-3: The 3rd Hinode Science Meeting, Proc. 1–4 December 2009, Tokyo, Japan*. ASP Conference Ser. Vol. 454. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific. 2012, p. 399. DOI: [10.1007/s11207-011-9834-2](https://doi.org/10.1007/s11207-011-9834-2).
- URL: <https://solarmonitor.org> (дата обращения 15 апреля 2025 г.).
- URL: https://cdaw.gsfc.nasa.gov/stereo/daily_movies (дата обращения 15 апреля 2025 г.).

URL: <https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME> (дата обращения 15 апреля 2025 г.).
URL: https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/halo/halo.html (дата обращения 15 апреля 2025 г.).
URL: <https://sprg.ssl.berkeley.edu/~tohban/browser/> (дата обращения 15 апреля 2025 г.).
URL: <https://izw1.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.htm> (дата обращения 15 апреля 2025 г.).
URL: https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/index.html (дата обращения 15 апреля 2025 г.).
URL: <https://gs671-suske.ndc.nasa.gov> (дата обращения 15 апреля 2025 г.).
URL: https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/ (дата обращения 15 апреля 2025 г.).

Как цитировать эту статью:

Файнштейн В.Г., Руденко Г.В., Загайнова Ю.С. Связь нарастания скорости КВМ на начальном этапе движения с изменением магнитных условий в области зарождения выброса массы. *Солнечно-земная физика*. 2025. Т. 11, № 2. С. 5–14. DOI: [10.12737/szf-112202501](https://doi.org/10.12737/szf-112202501).