

КИНЕМАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КВМ ТИПА STEALTH В ТРЕХМЕРНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

KINEMATIC CHARACTERISTICS OF STEALTH CME IN THREE-DIMENSIONAL SPACE

Я.И. Егоров 

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

В.Г. Файнштейн 

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

Ya.I. Egorov

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

V.G. Fainshtein

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

Аннотация. Для периода 2008–2014 гг. исследованы и сопоставлены кинематические характеристики движения корональных выбросов массы (КВМ) в трехмерном (3D) пространстве для трех групп КВМ: 1) КВМ типа stealth (далее — stealth-КВМ); 2) КВМ, возникшие на видимой стороне Солнца (для наблюдателя на Земле) и связанные с рентгеновскими вспышками и с эрупцией волокон; 3) все КВМ, зарегистрированные в указанный период. К stealth-КВМ мы отнесли КВМ, возникшие на видимой стороне Солнца и не связанные с рентгеновскими вспышками, а также с эрупцией волокон. Кинематические и некоторые физические характеристики этих КВМ были сопоставлены с аналогичными характеристиками выбросов массы, которые были отнесены к stealth-КВМ в работе [D’Huys et al., 2014]. После сравнения характеристик трех групп КВМ был сделан вывод, что в среднем stealth-КВМ имеют наименьшую скорость, кинетическую энергию, массу и угловой размер, центральный позиционный угол, а также угол φ между направлением движения КВМ в плоскости эклиптики и линией Солнце–Земля и угол λ между направлением движения КВМ в 3D-пространстве и плоскостью эклиптики. Обсуждаются также распределения КВМ разных типов по кинематическим характеристикам.

Ключевые слова: Солнце, корональный выброс массы, солнечная вспышка, эрупция волокна, кинематические характеристики движения КВМ.

Abstract. We have studied and compared kinematic characteristics of the motion of coronal mass ejections (CMEs) in three-dimensional (3D) space for three groups of CMEs for the period 2008–2014. These CME groups include: (i) stealth CMEs, (ii) CMEs that originate on the visible side of the Sun (for an observer on Earth) and are associated with X-ray flares and filament eruption, (iii) all CMEs registered during the given period. Stealth CMEs are CMEs that emerge on the visible side of the Sun and are unrelated to X-ray flares, as well as to filament eruption. We compare kinematic and some physical characteristics of these CMEs with those of a separate group of CMEs, classified as stealth in [D’Huys et al., 2014]. After comparing the characteristics of the three CME groups (i)–(iii), we concluded that stealth CMEs have, on average, the lowest velocity, kinetic energy, mass and angular size, central position angle, and also the angle φ between the direction of CME motion in the ecliptic plane and the Sun–Earth line and the angle λ between the direction of CME motion in 3D space and the ecliptic plane. We also discuss distributions of CMEs of different types by kinematic characteristics.

Keywords: Sun, coronal mass ejection, solar flare, filament eruption, kinematic characteristics of CME motion.

ВВЕДЕНИЕ

Многие корональные выбросы массы (КВМ), регистрируемые в поле зрения коронографов, связаны с различными проявлениями солнечной активности в нижней короне (для обозначения этой активности в литературе используется аббревиатура LCS — low coronal signatures): вспышками, эрупцией волокон и др. В то же время существуют КВМ, наблюдаемые коронографами, которые не связаны с LCS. Robbrecht et al. [2009] показали, что КВМ, не сопровождающиеся LCS, могут возникать на видимой стороне Солнца. Позже КВМ без LCS, возникшие на видимой стороне Солнца, стали называть корональными вы-

бросами массы типа stealth (далее — stealth-КВМ). В работе [Ma et al., 2010] были сопоставлены свойства КВМ, сопровождающихся LCS и не связанных с такой активностью, и было обнаружено заметное различие их свойств.

Некоторые исследователи предположили, что отсутствие LCS при возникновении КВМ может быть связано с характеристиками регистрирующей солнечное излучение аппаратуры (см., например, [Howard, Harrison, 2013]). Это означает, что формирование stealth-КВМ, скорее всего, сопровождается какой-то активностью в нижней короне (небольшие, возможно, кратковременные вспышки, эрупции небольших волокон и т. д.), но она не может быть за-

регистрирована аппаратурой, установленной на космических аппаратах (КА).

В работе [D’Huys et al., 2014] была изучена, пожалуй, одна из самых больших выборок stealth-KBM — 40 событий. Именно авторы этой работы предложили под stealth-KBM понимать корональные выбросы массы, которые возникают на видимой стороне Солнца, но не сопровождаются LCS. D’Huys et al. [2014] довольно детально изучили свойства отобранных stealth-KBM. Так, например, позиционный угол этих KBM часто оказывался близок к 0° (или к 360° , что то же самое), хотя, в принципе, мог принимать любое значение.

Одна из наиболее сложных проблем при исследовании stealth-KBM — доказать, что наблюдаемый KBM возник на видимой стороне Солнца. D’Huys et al. [2014] предложили оригинальный метод определения стороны Солнца (видимая или обратная для наблюдателя на Земле), на которой сформировался KBM, наблюдаемый одновременно в поле зрения коронографов LASCO на КА SOHO, а также COR2A и COR2B на КА STEREO-A, -B.

Alzate, Morgan [2017], используя усовершенствованные методы обработки изображений Солнца в различных спектральных каналах инструментов AIA/SDO, обнаружили, что формирование каждого stealth-KBM из работы [D’Huys et al., 2014] сопровождается некоторыми мелкомасштабными проявлениями солнечной активности. Был сделан вывод, что все 40 stealth-KBM из работы [D’Huys et al., 2014] были связаны с определенными формами LCS (джеты или эрупции маленьких волокон и др.). Alzate, Morgan [2017] сделали вывод о том, что отнесение перечисленных в работе [D’Huys et al., 2014] выбросов массы к группе stealth-KBM было обусловлено ограничениями пространственного и временного разрешения телескопов SDO/AIA и использованием неудовлетворительных методов предварительной обработки данных. В то же время, строго говоря, сведений об обнаруженной Alzate, Morgan [2017] активности, сопровождающей появление KBM из работы [D’Huys et al., 2014], недостаточно для точного определения места возникновения этих KBM. Наиболее точно это можно сделать, зарегистрировав возникновение фронтальной структуры KBM, как это было сделано, например, в работе [Zagainova et al., 2020].

Сегодня считается, что большинство (до 80 %) эрупций волокон связаны с KBM [Schmieder et al., 2013]. Было показано [Schmieder et al., 2013], что в ряде случаев эрупция волокна является триггером формирования KBM, и был предложен механизм генерации KBM эруптивным волокном [Fainshtein, Egorov, 2015]. Однако, как было отмечено выше, эрупция волокон не предшествует stealth-KBM. На основании этого можно предположить, что механизм генерации stealth-KBM отличается от механизмов генерации многих «обычных KBM», но детали этого механизма остаются неизвестными.

В настоящей работе за период 2008–2014 гг. выделена группа KBM, возникших на видимой поверхности Солнца (для наблюдателя на Земле) и не связанных с рентгеновскими вспышками баллом

более $B1.0$, а также с эрупцией волокон. Эти KBM мы отнесли к stealth-KBM. Фактически мы предложили метод автоматического выделения stealth-KBM. Для этих KBM, а также для всех анализировавшихся KBM и KBM, возникших на видимой стороне Солнца, но связанных с рентгеновскими вспышками и/или с эрупциями волокон, были сопоставлены кинематические характеристики KBM, измеренные в трехмерном (3D) пространстве. Для этих групп KBM были также сопоставлены относительные частоты появления различных значений кинематических характеристик движения KBM в 3D-пространстве. Для этих трех групп KBM и для KBM, исследованных D’Huys et al. [2014] и также отнесенных ими к stealth-KBM, были сопоставлены распределения относительных частот появления в зависимости от значений их кинематических и других характеристик по данным LASCO.

ДАнные И МЕТОды ИХ АНАЛИЗА

Stealth-KBM характеризуются отсутствием LCS, поэтому для их отбора из огромного числа событий требуется исключить KBM, связанные с эрупцией волокон и вспышками, а также рассматривать только те KBM, которые произошли на видимой стороне Солнца, поскольку на обратной стороне мы не можем достоверно установить связь KBM с LCS. Чтобы определить сторону Солнца, на которой возник KBM, необходимо определить угол φ между направлением движения KBM в плоскости эклиптики и линией Солнце–Земля (рис. 1). Угол φ (см. рис. 1) принимает положительные значения против часовой стрелки и отрицательные по часовой стрелке от линии Солнце–Земля. При $|\varphi| > 90^\circ$ KBM возник на обратной стороне Солнца, при $|\varphi| \leq 90^\circ$ — на видимой.

Для нахождения угла φ каждого рассмотренного KBM мы использовали метод триангуляции, описанный в работе [Egorov, Fainshtein, 2021], который предполагает использование данных любых пар коронографов, находящихся на КА SOHO (LASCO [Brueckner et al., 1995]) и STEREO-A и STEREO-B (Solar Terrestrial Relations Observatory [Kaiser et al., 2008];

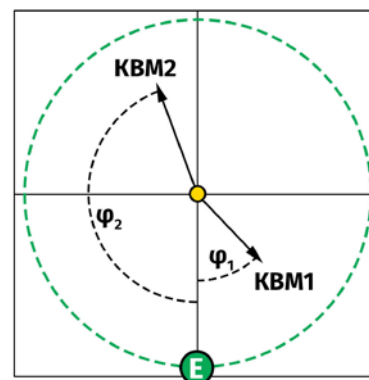


Рис. 1. Угол $\varphi < 0$ по часовой стрелке и $\varphi > 0$ против часовой стрелки от линии Солнце–Земля. На плоскости эклиптики показаны Солнце (желтый круг), Земля (зеленый круг), направления движения двух KBM (черные стрелки). KBM1 возник на видимой стороне Солнца, KBM2 — на обратной стороне Солнца

коронаграфы COR2;COR2 — часть модуля SECCHI на борту КА STEREO [Howard et al., 2008]. Для расчета угла φ используется информация о положении КВМ в плоскости неба коронаграфа. Эти данные можно получить из каталогов КВМ для LASCO [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list] и STEREO [<http://spaceweather.gmu.edu/seeds/secchi>], в которых содержится также информация о позиционном угле, угловом размере, проекционной линейной скорости и других параметрах КВМ.

Угол φ находился с помощью полученных нами соотношений [Egorov, Fainshtein, 2021]

$$\varphi_{1,2} = \operatorname{atan}\left(\frac{S \sin b - \sin a}{S \cos b + \cos a}\right) \pm n\pi, n \in [0,1],$$

$$\varphi_{3,4} = \operatorname{atan}\left(\frac{S \sin b + \sin a}{\cos a - S \cos b}\right) \pm n\pi, n \in [0,1].$$

Здесь $S=S_A/S_B$, где S_A, S_B — радиальные расстояния от центра Солнца до границы проекции КВМ в плоскости неба двух коронаграфов на плоскость эклиптики (для определенности будем считать, что это коронаграфы COR2A и COR2B); \mathbf{a} и \mathbf{b} — углы между линиями Солнце–Земля и Солнце — КА STEREO-A и STEREO-B соответственно. Система уравнений (1)–(2) имеет четыре решения. Для выбора единственного правильного решения учитывается направление движения КВМ относительно центрального меридиана (к востоку или к западу) в поле зрения LASCO C2, а также в поле зрения каждого коронаграфа.

Мы будем также использовать расстояния R_{3D} границы КВМ относительно центра Солнца в трехмерном пространстве:

$$R_{3D} = \left[\frac{S_A}{|\sin(\varphi - a)|} \right] / \cos \lambda.$$

Здесь λ — угол между направлением движения КВМ в трехмерном пространстве и плоскостью эклиптики, которую в данном случае будем считать совпадающей с плоскостью солнечного экватора:

$$\lambda = \operatorname{atan}(\operatorname{tg} \Lambda \sin |\varphi|),$$

где Λ — угол между направлением движения КВМ и плоскостью эклиптики в плоскости неба коронаграфа LASCO C2: $\Lambda > 0$, если КВМ движется к северу от плоскости солнечного экватора, и $\Lambda < 0$, если КВМ движется к югу от плоскости экватора. Аналогичные знаки имеет угол λ . Формула (3) позволяет найти скорость КВМ в трехмерном пространстве:

$$V_{3D} = dR_{3D}(t) / dt.$$

В этой работе мы изучали свойства различных типов КВМ за период с 2008 по 2014 г. включительно, когда все три коронаграфа функционировали. В этот период в каталоге LASCO зарегистрировано 6850 событий, для которых имеются оценки массы и энергии КВМ. КВМ, для которых эти данные отсутствуют, не подходят для исследования, поскольку были плохо видны в поле зрения коронаграфа или для них имеются измерения для небольшого количества моментов времени. В каталогах STEREO-A и -B содержится 7809 и 9529 подходящих для анализа событий соответственно.

Мы проводили анализ для трех групп КВМ. Первая группа — это *stealth*-КВМ, т. е. КВМ, возникшие на видимой стороне Солнца и не связанные с рентгеновскими вспышками балла больше В1.0 и с эруптивными волокнами, зарегистрированными в пределах двух часов относительно момента появления КВМ в поле зрения коронаграфа LASCO C2. Вторая группа — это КВМ, возникшие на видимой стороне Солнца и связанные с рентгеновскими вспышками и/или эрупцией волокон. Эту группу КВМ мы обозначили как FSCME with LCS. Здесь FSCME — аббревиатура выражения “front side coronal mass ejection”, т. е. КВМ, возникшие на видимой стороне Солнца. Третью группу мы обозначили как «Все КВМ». Эта группа включает *stealth*-КВМ, FSCME with LCS и все КВМ, зарегистрированные на обратной стороне Солнца.

Большинство приведенных в статье графиков показывает зависимость относительной частоты появления (RF) значения какого-либо параметра от значения другого параметра. По определению, RF — это доля КВМ определенного типа от всех рассмотренных КВМ этого типа, которая меняется в зависимости от какого-то свойства КВМ (например, от года наблюдения КВМ, см. рис. 3).

Опишем процедуру последовательного исключения событий из общей выборки, которая позволяет выделить *stealth*-КВМ:

1. Распределение событий из разных каталогов по парам коронаграфов, необходимое для применения методики нахождения стороны Солнца, на которой возник КВМ, предложенной в работе [Egorov, Fainshtein, 2021]. Чтобы убедиться, что зарегистрированные события из разных каталогов относятся к одному и тому же КВМ, мы ввели следующие критерии: время первого измерения положения КВМ в каталогах не должно отличаться более чем на полтора часа; событие должно быть зарегистрировано обоими аппаратами в одном и том же полушарии — южном или северном (рис. 2, *a*). Указанным критериям соответствуют одновременно наблюдавшиеся на коронаграфах LASCO C2 и COR2A 2876 КВМ; на COR2A и COR2B — 2004 КВМ; на LASCO C2 и COR2B — 2806 КВМ. При этом в выбранный промежуток времени (2008–2014 гг.) LASCO C2 зарегистрировал 6850 КВМ, COR2A — 7809 КВМ, COR2B — 9529 КВМ (рис. 2, *a*).

2. Отбор событий, для которых доступны одновременные измерения более чем одной парой космических аппаратов.

3. Расчет и сравнение углов φ для каждого события, найденных по данным разных пар коронаграфов, и исключение событий, для которых разница в полученных углах превышает 10° по модулю.

4. Исключение событий, находящихся на обратной стороне Солнца, что соответствует диапазону углов $|\varphi| > 90^\circ$.

5. Исключение КВМ, связанных со вспышками, которые зарегистрированы в каталоге [<https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-features/solar-flares/x-rays/goes/xrs>].

6. Исключение КВМ, связанных с эрупцией волокон, которые зарегистрированы в каталоге [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/autope].

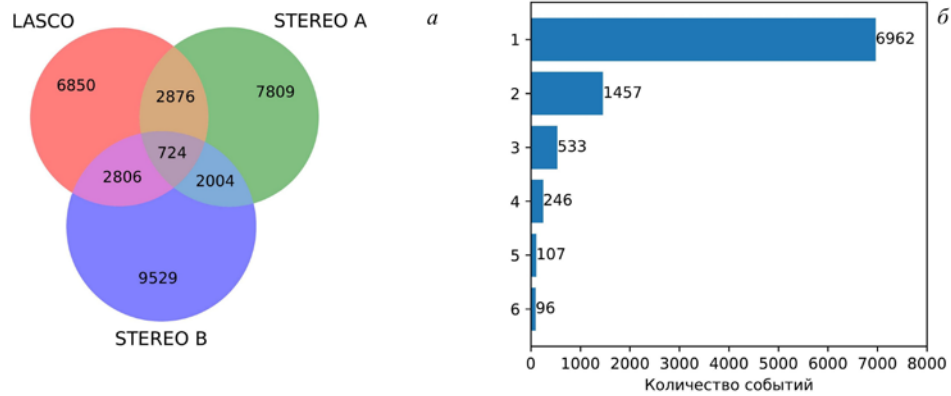


Рис. 2. Выборки из разных каталогов КВМ, зарегистрированных разными коронографами, с указанием количества событий (а); количество событий в парах выборок на каждом этапе процедуры, описанной в разделе «Данные и методы их анализа» в пунктах 1–6 (б)

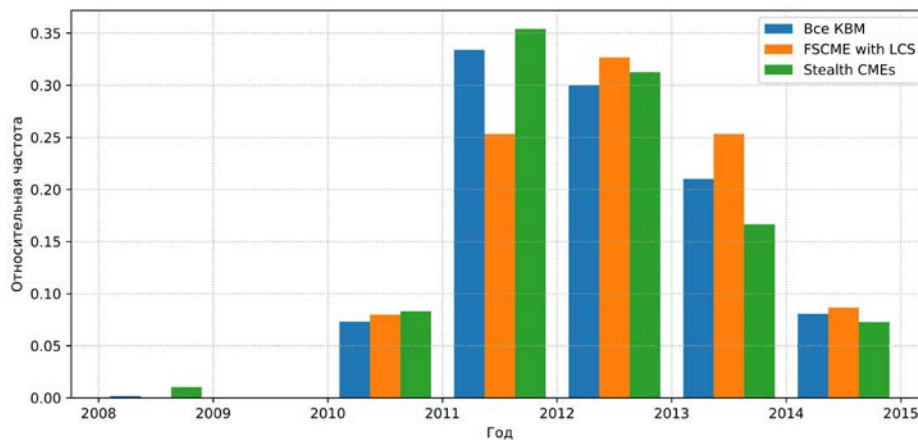


Рис. 3. Изменение со временем относительной частоты появления КВМ групп stealth-КВМ, FSCME with LCS и «Все КВМ», зарегистрированных в период 2008–2014 гг.

Таким образом, нам удалось выделить за период 2008–2014 гг. 96 stealth-КВМ. Финальный список stealth-КВМ приведен в приложении.

Количество событий, остающихся после выполнения каждого шага из приведенного выше списка необходимых шагов, показано на рис. 2, б. Все обсуждавшиеся в пунктах 1–6 процедуры автоматизированы, для их реализации написаны специальные программы.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Ниже мы сравниваем характеристики трех групп КВМ: 1) stealth-КВМ, 2) FSCME with LCS и 3) всех КВМ, зарегистрированных в указанный период. Кроме того в некоторых случаях мы включаем в рассмотрение КВМ, которые отнесены к stealth-КВМ в работе [D’Huys et al., 2014].

На рис. 3 показано изменение со временем относительной частоты (RF) появления в течение года КВМ каждой рассмотренной группы. Видно, что доля stealth-КВМ превышает доли других типов КВМ в 2010 г., в окрестности минимума солнечной активности, и в период ее роста в 2011 г. и меньше доли других групп КВМ в 2013–2014 гг. — в максимуме активности. В 2012 г. доля stealth-КВМ больше доли всех КВМ и меньше доли FSCME with LCS. Наш анализ показал, что изменение со временем

относительной частоты появления КВМ каждой рассмотренной группы различается. Для stealth-КВМ RF резко падает слева от максимума в 2011 г. и относительно медленно меняется справа от максимального значения. RF для FSCME with LCS имеет широкий пик в зависимости от времени с максимумом в 2012 г. и характеризуется наименьшим и наибольшими значениями среди трех рассмотренных групп в 2011 и в 2012–2014 гг соответственно. Распределение RF в зависимости от времени для группы «Все КВМ» имеет довольно асимметричную форму относительно максимального значения, похожую на форму распределения для stealth-КВМ. Мы не обсуждаем значения RF в 2008 г. из-за большой погрешности нахождения параметров КВМ в этот период, связанной с небольшими отклонениями КА STEREO-A, -B от Земли.

На рис. 4 для трех групп КВМ сопоставлены распределения RF в зависимости от долготы (угол ϕ) и широты (угол λ) в трехмерном пространстве. Из рис. 4 следует, что КВМ из групп stealth-КВМ и FSCME with LCS сосредоточены вблизи углов $\phi = -50^\circ$ и $\phi = 50^\circ$, причем stealth-КВМ оказалось больше в окрестности $\phi = -50^\circ$. КВМ из группы «Все КВМ» с близкими значениями относительной частоты оказались на углах $\phi = -170^\circ$, -50° и 30° и с несколько повышенной относительной частотой — на $\phi = 110^\circ$. Распре-

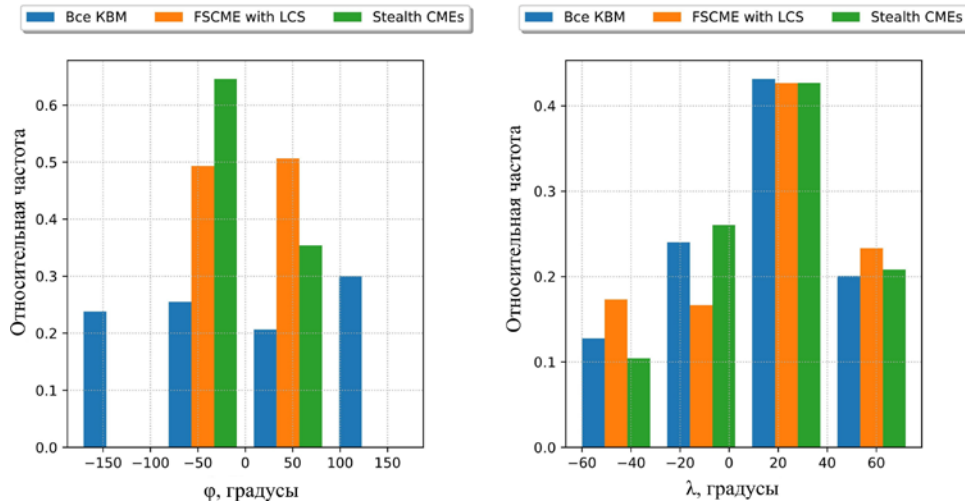


Рис. 4. Относительная частота появления KBM групп *stealth*-KBM, FSCME with LCS и «Все KBM» в зависимости от долготы (угол ϕ) и широты (угол λ) в трехмерном пространстве

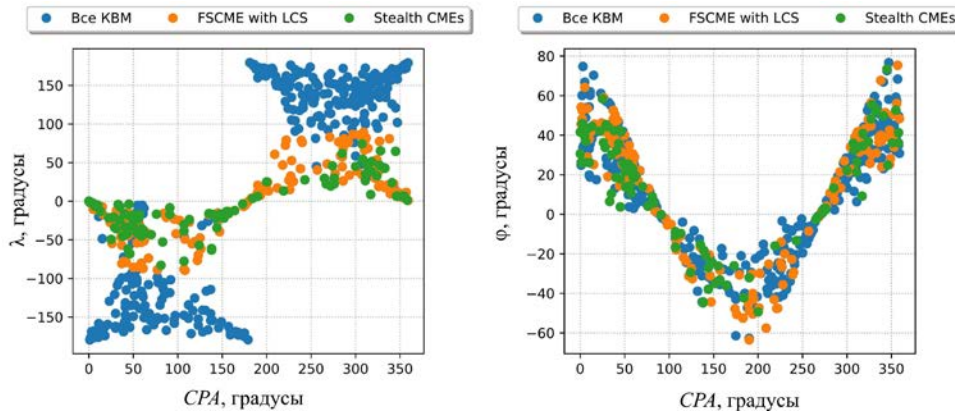


Рис. 5. Зависимость углов ϕ и λ от CPA в плоскости неба коронографов LASCО для трех групп KBM

деления $RF(\lambda)$ для групп *stealth*-KBM и «Все KBM» имеет колоколообразную форму (т. е. RF уменьшается в обе стороны по мере удаления от λ , при котором RF максимальна). При этом быстрота спада RF для *stealth*-KBM в левой части распределения $RF(\lambda)$ оказалась больше, чем для всех KBM. Распределение $RF(\lambda)$ для FSCME with LCS после первоначального спада слева от максимума вышло на плато.

На рис. 5 показана связь углов ϕ и λ с центральным позиционным углом KBM CPA (позиционным углом оси KBM, проходящей из центра Солнца через середину KBM) в плоскости неба коронографов LASCО для групп *stealth*-KBM, FSCME with LCS и «Все KBM». Для всех групп количество KBM примерно одинаковым образом распределено относительно $\phi = \pm 90^\circ$, а также на видимой ($\phi = 0 - 90^\circ$ и $\phi = 0 \div -90^\circ$) или обратной ($\phi = 90^\circ - 180^\circ$ и $\phi = -90^\circ \div -180^\circ$) стороне Солнца. Связь λ с CPA для всех рассмотренных групп KBM, как и ожидалось, оказалась линейной с противоположными углами наклона зависимостей в диапазоне CPA 0–180° и 180–360°.

Мы исследовали и сопоставили связь скорости движения в трехмерном пространстве V_{3D} с углами ϕ и λ для трех групп KBM (рис. 6). Для углов ϕ (см. рис. 6, верхние панели) мы представили распределение числа событий в прямоугольниках размером

200 км/с×40° для группы «Все KBM» и 200 км/с×20° для групп FSCME with LCS и *stealth*-KBM. Из рис. 6 следует, что максимальное количество событий для всех KBM (верхняя левая панель) зарегистрировано в прямоугольниках с центрами (300 км/с, -130°), (300 км/с, 0°); для FSCME with LCS (верхняя центральная панель) — в прямоугольнике с центром (300 км/с, 20°) и для *stealth*-KBM (верхняя правая панель) — в прямоугольнике с центром (300 км/с, 0°).

На трех нижних панелях рис. 6 показаны распределения скорости KBM — угол λ для трех групп KBM в прямоугольниках размерами 200 км/с×20°. Видно, что максимальное количество событий для группы «Все KBM» (слева) находится в прямоугольнике с центром (500 км/с, 40°), для FSCME with LCS (по центру) — в прямоугольнике с центром (700 км/с, 40°) и для *stealth*-KBM (справа) — в прямоугольнике с центром (300 км/с, 40°).

На рис. 7 показано распределение количества событий в зависимости от скорости KBM в трехмерном пространстве для трех групп KBM в различные годы периода наблюдений. Зависимость числа событий показана в прямоугольниках размерами 100 км/с×1 год. Из рис. 7 следует, что максимальное количество событий для группы «Все KBM» зарегистрировано в прямоугольнике с центром (350 км/с, 2011 г.), для FSCME

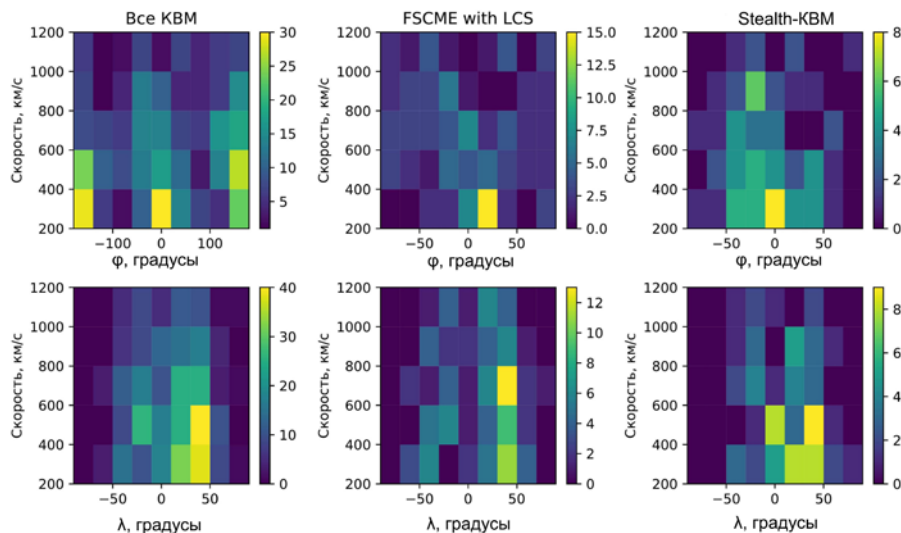


Рис. 6. Карты числа KBM в прямоугольниках заданного размера в зависимости от скорости движения KBM в трехмерном пространстве и углов ϕ и λ (верхние и нижние панели соответственно). Количество KBM показывает цветовая шкала справа от панели

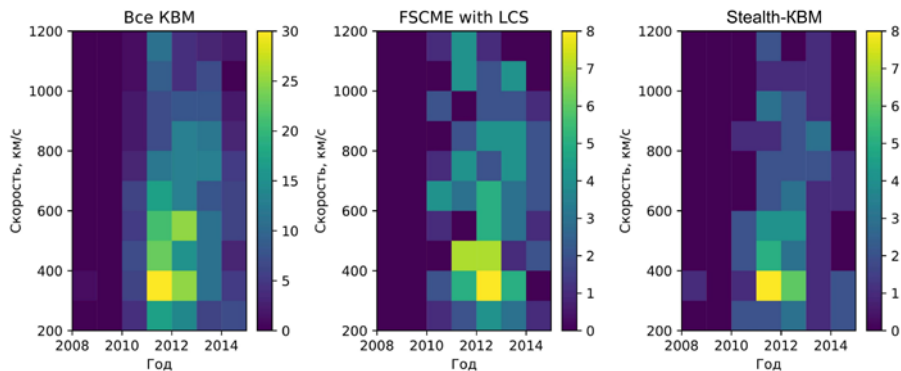


Рис. 7. Карты числа KBM в прямоугольниках заданного размера в зависимости от скорости движения KBM в трехмерном пространстве и года наблюдений KBM. Количество KBM показывает цветовая шкала справа от панели

with LCS — в прямоугольнике с центром (350 км/с, 2012 г.), для stealth-KBM — в прямоугольнике с центром (350 км/с, 2011 г.).

Результаты расчетов кинематических характеристик нескольких KBM в нашей работе [Egorov, Fainshtein, 2021] показали, что по мере движения KBM в трехмерном пространстве угол ϕ меняется со временем. Мы попытались выяснить, в какой степени быстрота изменения ϕ с расстоянием связана с параметрами движения KBM: CPA, λ и скоростью KBM. Соответствующие зависимости для трех групп KBM показаны на рис. 7. Для каждого рассмотренного KBM была построена зависимость угла ϕ от расстояния от центра Солнца в трехмерном пространстве R_{3D} , которая аппроксимировалась линейной регрессией. Наклон этой линии к горизонтальной оси R_{3D} мы использовали в качестве характеристики быстроты изменения угла ϕ с высотой — $d\phi/dR_{3D}$.

Из рис. 8 следует, что для большинства KBM в трех группах событий $-2^\circ/R_s < d\phi/dR_{3D} < 2^\circ/R_s$ (R_s — радиус Солнца) для всего диапазона изменения анализируемого параметра. При этом для каждой группы KBM есть диапазон изменения рассмотренных параметров, в пределах которого $-5^\circ/R_s < d\phi/dR_{3D} < 5^\circ/R_s$: для CPA

это окрестность углов примерно 50° и 320° , для λ — окрестность угла 25° , для скорости KBM — область примерно 400 км/с.

Отметим, что для каждого параметра в каждой группе есть KBM, для которых $-10^\circ/R_s < d\phi/dR_{3D} < -5^\circ/R_s$ и $5^\circ/R_s < d\phi/dR_{3D} < 10^\circ/R_s$. Больше всего в эти диапазоны быстроты изменения ϕ с высотой попадают корональные выбросы массы из группы «Все KBM». Пока этот эффект нам объяснить не удалось. Трудно объяснить также, что, по визуальным наблюдениям, FSCME with LCS более часто выходят за пределы полосы $-5^\circ/R_s < d\phi/dR_{3D} < 5^\circ/R_s$, чем stealth-KBM.

На рис. 9 показаны определенные по данным LASCO относительные доли (или относительные частоты RF) различных значений линейной проекционной скорости, ускорения, кинетической энергии, углового размера и массы KBM для выделенных нами групп stealth-KBM и FSCME with LCS, а также для группы stealth-KBM из работы [D’Huys et al., 2014]. Характеристики KBM брались из каталога SOHO LASCO CME CATALOG [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list]. Заметим, что из 40 stealth-KBM, обсуждавшихся в работе [D’Huys et al., 2014], в указанном каталоге удалось обнаружить

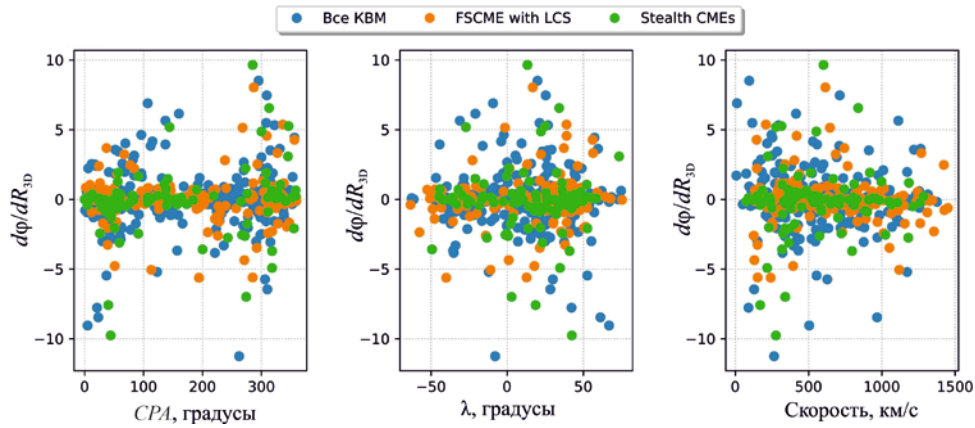


Рис. 8. Быстрога изменения угла ϕ в зависимости от CPA , λ и скорости в трехмерном пространстве для трех групп KBM

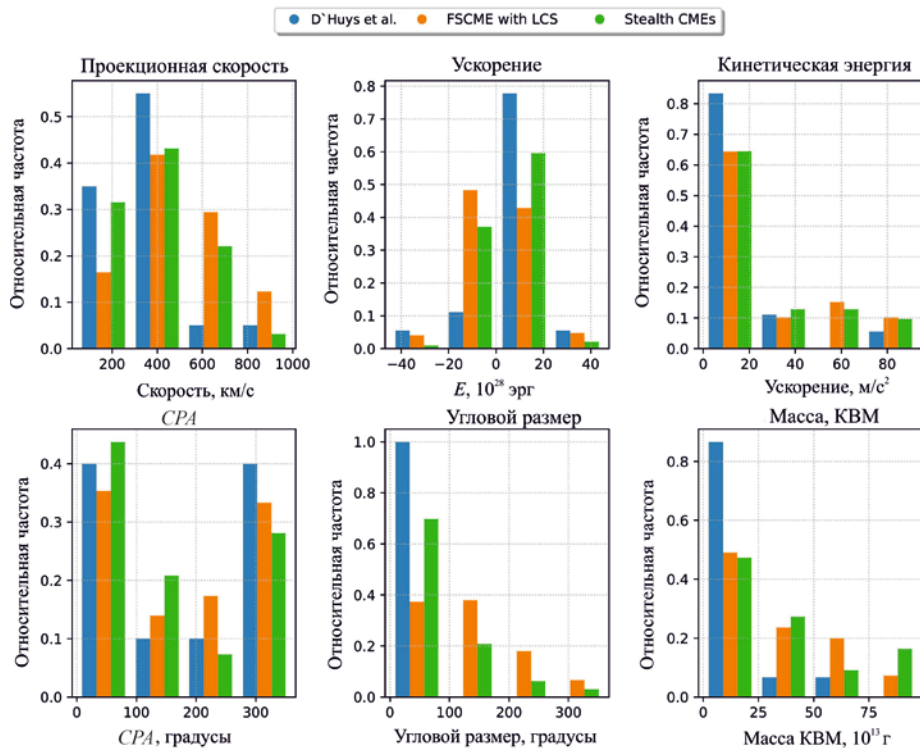


Рис. 9. Относительная частота появления KBM с различными значениями параметров для трех групп событий: stealth-KBM из работы [D’Huys et al., 2014], FSCME with LCS и stealth-KBM, отобранных авторами настоящей работы

лишь 20 событий. Из рис. 9 следует, что характер изменения относительной частоты появления KBM одного типа в зависимости от значения выбранного параметра (характеристики KBM) различается для разных параметров KBM, но приблизительно одинаков для заданного параметра для KBM разных типов. Например, зависимость относительной частоты появления KBM от линейной проекционной скорости оказывается колоколообразной, а от центрального позиционного угла (CPA) близка к параболической. Из рис. 9 следует также, что скорость, кинетическая энергия, масса, угловой размер stealth-KBM из работы [D’Huys et al., 2014] в среднем меньше, чем аналогичные параметры выделенных нами stealth-KBM (см. также таблицу). Из графика зависимости RF от CPA видно, что минимальные значения CPA для всех трех групп KBM оказываются в окрестности 215° , а максимальные значения RF оказываются

вблизи $CPA=30^\circ$ и 320° . Для кинетической энергии, углового размера и массы RF уменьшается с ростом величины параметра KBM.

В таблице показаны характеристики KBM, усредненные по приведенным группам событий: А — линейная проекционная скорость KBM (в км/с); В — ускорение KBM (в м/с²); С — энергия (в 10^{29} эрг); D — центральный позиционный угол KBM (в градусах); Е — угловой размер KBM (в градусах); F — масса KBM (в 10^{13} г); G — угол ϕ (в градусах), Н — угол λ (в градусах). В круглых скобках указано количество событий в группе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

До последнего времени в основном изучались отдельные stealth-KBM или небольшие группы таких KBM. Мы предложили методику автоматического

	A	B	C	D	E	F	G	H
Stealth-KBM (96)	399±40	10±3	26±16	149±24	84±13	16±6	28±4	27±3
КВМ на видимой стороне Солнца (150)	530±47	10±2	130±98	174±19	129±13	36±10	37±4	33±2
КВМ на обратной стороне Солнца (287)	414±24	10±1	39±18	187±13	97±9	17±3	146±2	27±1
Все КВМ (533)	444±20	10±1	62±29	177±10	103±6	22±3	94±5	29±1
D’Huys et al. (20)	351±74	29±9	2±1	178±68	44±12	7±5		

выделения stealth-KBM в течение произвольного промежутка времени, когда КВМ можно было наблюдать более чем одной парой разнесенных в пространстве коронографов. Таким образом, за большой промежуток времени можно выделить большое количество stealth-KBM и исследовать их свойства. В данном случае мы определили stealth-KBM как корональные выбросы массы, возникающие на видимой стороне Солнца и не связанные с рентгеновскими вспышками и эруптивными волокнами по данным каталогов этих процессов. Определение стороны Солнца, на которой возникли stealth-KBM, производилось с помощью методики нахождения направления движения КВМ в трехмерном пространстве, недавно предложенной нами [Egorov, Fainshtein, 2021]. Таким образом нам удалось выделить 96 stealth-KBM за период 2008–2014 гг.

В данной работе мы сопоставили свойства трех групп КВМ: 1) stealth-KBM — 96 событий; 2) КВМ, возникшие на видимой стороне Солнца (front side) и связанные с LCS (FSCME with LCS) — 150 событий; 3) все КВМ, рассмотренные в рамках подхода, описанного в разделе «Данные и методы их анализа», — 533 события.

Наш анализ показал, что относительная частота RF регистрации stealth-KBM превышает RF появления FSCME with LCS и всех КВМ в 2011 и 2012 гг., т. е. в минимуме и на фазе роста. Характер изменения относительной частоты RF появления FSCME with LCS со временем существенно отличается от аналогичной зависимости $RF(t)$ для stealth-KBM: в первом случае распределение $RF(t)$ относительно максимума довольно симметричное, а во втором — сильно несимметричное с более резким спадом слева от максимума.

Показано, что для stealth-KBM в среднем угол φ составляет по модулю 27° с более частым попаданием значений этого угла к востоку от линии Солнце–Земля в плоскости солнечного экватора (отрицательные значения φ). Для FSCME with LCS этот угол равен 37° . Распределение $RF(\lambda)$ имеет четко выраженную колоколообразную форму для stealth-KBM и несколько отличающуюся от колоколообразной форму для FSCME with LCS. Положения максимумов распределений $RF(\lambda)$ для трех групп КВМ совпадают.

Установлена связь углов φ и λ с центральным позиционным углом CPA в плоскости неба коронографов LASCO для всех рассмотренных групп КВМ. Примерно одинаковое количество stealth-KBM оказались в диапазонах CPA 0° – 180° и 180° – 360° .

Связь $\lambda(CPA)$ оказалась линейной с противоположными углами наклона зависимостей в диапазоне CPA 0° – 180° и 180° – 360° .

Для групп «Все КВМ», FSCME with LCS и stealth-KBM сопоставлена связь скорости движения КВМ в трехмерном пространстве V_{3D} с углами φ и λ . Найдены места максимальной локализации числа КВМ на плоскостях V_{3D} – φ и V_{3D} – λ . Так, например, больше всего зарегистрировано stealth-KBM в прямоугольниках с координатами центра ($V_{3D}=300$ км/с; $\varphi=0^\circ$); ($V_{3D}=500$ км/с; $\lambda=40^\circ$). Найдены распределения количества событий в зависимости от скорости КВМ в трехмерном пространстве для трех групп КВМ в различные годы периода наблюдений. Найдены места максимальной локализации КВМ на плоскостях V_{3D} –годы. Больше всего stealth-KBM зарегистрировано в прямоугольнике с координатами ($V_{3D}=300$ км/с; 2011 г.).

В работе [Egorov, Fainshtein, 2021] мы показали, что по мере движения КВМ в трехмерном пространстве угол φ меняется со временем. В данной работе мы изучили, в какой степени быстрота изменения φ с расстоянием связана с CPA , углом λ и скоростью КВМ в трехмерном пространстве. Для большинства КВМ в трех группах событий $-2^\circ/R_s < d\varphi/dR_{3D} < 2^\circ/R_s$ для всего диапазона изменения анализируемого параметра. При этом для каждой группы КВМ есть диапазон изменения параметра, в пределах которого $-10^\circ/R_s < d\varphi/dR_{3D} < 10^\circ/R_s$.

Интересно сравнить свойства stealth-KBM и FSCME with LCS. КВМ обеих групп возникли на видимой стороне Солнца, но stealth-KBM не связаны с солнечными вспышками и/или эрупцией волокон, а FSCME with LCS связаны. Средние значения линейной проекционной скорости, кинетической энергии, центрального позиционного угла, углового размера и массы stealth-KBM меньше, чем FSCME with LCS, и лишь ускорения в среднем одинаковы для этих групп КВМ.

Для stealth-KBM, FSCME with LCS, а также для stealth-KBM из работы [D’Huys et al., 2014] по данным LASCO были рассчитаны относительные частоты появления для значений линейной проекционной скорости, ускорения, кинетической энергии, угловых размеров, центрального позиционного угла. Установлено, что характер изменения относительной частоты появления КВМ каждого типа в зависимости от значения выбранного параметра (характеристики КВМ) различается для разных параметров КВМ, но приблизительно одинаков для заданного

параметра для КВМ разных типов. Показано, что в среднем скорость, кинетическая энергия, угловой размер и масса stealth-КВМ из работы [D’Huys et al., 2014] меньше, чем аналогичные параметры выделенных нами stealth-КВМ.

Ниже, в приложении, приведены сведения об обнаруженных нами stealth-КВМ. Предполагается, что в будущем будет изучена связь с этими КВМ мелко-масштабной и быстроменяющейся активности в нижней короне на видимой стороне Солнца. Результаты аналогичных исследований для двух stealth-КВМ, выделенных другими исследователями, были недавно опубликованы в работе [Zagainova et al., 2020].

Авторы благодарят команды SECCHI, LASCO за возможность свободного использования данных этих инструментов. Работа выполнена в рамках базового финансирования программы ФНИ П.16 и при частичной поддержке гранта РФФИ № 20-02-00150.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Alzate N., Morgan H. Identification of low coronal sources of stealth coronal mass ejections using new image processing techniques. *Astrophys. J.* 2017. Vol. 840, article id. 103. 14 p. DOI: [10.3847/1538-4357/aa6caa](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa6caa).

Brueckner G.E., Howard R.A., Koomen M.J., et al. The Large Angle Spectroscopic Coronagraph (LASCO). *Solar Phys.* 1995. Vol. 162. P. 357. DOI: [10.1007/BF00733434](https://doi.org/10.1007/BF00733434).

D’Huys E., Seaton D., Poedts S., Berghmans D. Visualizing fuzzy overlapping communities in networks. *Astrophys. J.* 2014. Vol. 795, iss. 1, article id. 49. 12 p. DOI: [10.1088/0004-637X/795/1/49](https://doi.org/10.1088/0004-637X/795/1/49).

Egorov Ya.I., Fainshtein V.G. A simple technique for identifying the propagation direction of CME in a 3D space. *Solar Phys.* 2021. Vol. 296, iss. 9, article id. 126. 14 p. DOI: [10.1007/s11207-021-01904-3](https://doi.org/10.1007/s11207-021-01904-3).

Fainshtein V.G., Egorov Ya.I. Initiation of CMEs associated with filament eruption, and the nature of CME related shocks. *Adv. Space Res.* 2015. Vol. 55, iss. 3. P. 798–807. DOI: [10.1016/j.asr.2014.05.019](https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.05.019).

Howard T., Harrison R. Stealth coronal mass ejections: A perspective. *Solar Phys.* 2013. Vol. 285. P. 269–280. DOI: [10.1007/s11207-012-0217-0](https://doi.org/10.1007/s11207-012-0217-0).

Howard R.A., Moses J.D., Vourlidas A., et al. Sun Earth Connection Coronal and Heliospheric Investigation (SECCHI). *Space Sci. Rev.* 2008. Vol. 136, iss. 1-4. P. 67–115. DOI: [10.1007/s11214-008-9341-4](https://doi.org/10.1007/s11214-008-9341-4).

Kaiser M.L., Kucera T.A., Davila J.M., et al. The STEREO Mission: An Introduction. *Space Sci. Rev.* 2008. Vol. 136, iss. 1-4. P. 5–16. DOI: [10.1007/s11214-007-9277-0](https://doi.org/10.1007/s11214-007-9277-0).

Ma S., Attrill G.D.R., Golub L., Lin J. Statistical study of coronal mass ejections with and without distinct low coronal signatures. *Astrophys. J.* 2010. Vol. 722. P. 289–301. DOI: [10.1088/0004-637X/722/1/289](https://doi.org/10.1088/0004-637X/722/1/289).

Robbrecht E., Patsourakos S., Vourlidas A. No trace left behind: Stereo observation of a coronal mass ejection without low coronal signatures. *Astrophys. J.* 2009. Vol. 701. P. 283–291. DOI: [10.1088/0004-637X/701/1/283](https://doi.org/10.1088/0004-637X/701/1/283).

Schmieder B., Démoulin P., Aulanier G. Solar filament eruptions and their physical role in triggering coronal mass ejections. *Adv. Space Res.* 2013. Vol. 51, iss. 11. P. 1967–1980. DOI: [10.1016/j.asr.2012.12.026](https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.12.026).

Zagainova Iu.S., Fainshtein V.G., Gromova L.I., Gromov S.V. Source region identification and geophysical effects of stealth coronal mass ejections. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2020. Vol. 208, article id. 105391. DOI: [10.1016/j.jastp.2020.105391](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105391).

URL: https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list (дата обращения 30 марта 2022 г.).

URL: <http://spaceweather.gmu.edu/seeds/secchi> (дата обращения 30 марта 2022 г.).

URL: <https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-features/solar-flares/x-rays/goes/xrs> (дата обращения 30 марта 2022 г.).

URL: https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/autope (дата обращения 30 марта 2022 г.).

Как цитировать эту статью:

Егоров Я.И., Файнштейн В.Г. Кинематические характеристики stealth-КВМ в трехмерном пространстве. *Солнечно-земная физика*. 2022. Т. 8, № 3. С. 14–23. DOI: [10.12737/szf-83202202](https://doi.org/10.12737/szf-83202202).

Приложение

Stealth-KBM

A	B	C	D	E	F	G	H	A	B	C	D	E	F	G	H
2008-02-24	74	25	378	9	2.90E+12	-8.51	-0.15	2012-03-15	52	107	485	-5.8	9.2E+14	-68.04	41.85
2010-10-06	6	191	282	7	2.10E+15	-28.21	21.64	2012-03-17	318	96	505	-4.9	3.2E+14	6.34	-32.04
2010-11-15	132	26	191	37	2.30E+13	-15.86	-15.29	2012-03-21	155	161	186	4.2	1.1E+15	25.09	-49.36
2010-11-24	77	46	142	5.7	2.20E+13	-16.73	4.10	2012-03-23	326	188	700	3.8	4.3E+15	34.87	26.43
2010-11-30	76	100	333	3.3	1.30E+15	-37.16	18.51	2012-03-24	112	105	443	-7.3	3.9E+15	-16.10	-33.15
2010-12-07	265	79	203	5.6	2.20E+15	22.34	2.29	2012-03-27	319	162	1148	-13.1	4.6E+15	3.64	-42.20
2010-12-12	93	78	417	6.1	6.60E+15	-23.65	-9.66	2012-04-02	23	135	350	5.5	2.4E+15	-61.28	-44.25
2010-12-16	321	88	580	0.8	1.20E+15	42.90	53.19	2012-04-05	64	119	470	7.6	5.2E+15	-63.25	-44.76
2010-12-21	57	50	322	7	4.10E+13	-17.63	13.78	2012-04-28	131	101	469	18.2	1.4E+15	-38.42	-10.76
2011-02-25	349	63	370	12	6.50E+14	24.02	49.77	2012-04-30	7	46	316	5.6	5.3E+11	-34.43	-37.89
2011-04-09	346	55	172	0.9	2.90E+14	0.00	30.64	2012-05-19	273	27	201	6.1	5.4E+13	8.70	9.21
2011-04-15	47	31	195	-16.8	1.40E+14	-33.36	32.32	2012-05-20	144	83	273	-3.6	3.1E+14	-17.03	45.61
2011-04-17	46	75	218	5.1	5.60E+14	-32.73	25.96	2012-06-13	166	118	461	4	3.6E+15	-1.98	26.30
2011-04-17	37	33	612	19.8	7.30E+14	-16.42	18.61	2012-06-17	24	36	193	2.3	6E+13	-18.78	17.84
2011-04-19	38	44	688	-12.5	2.10E+15	-45.34	42.32	2012-06-27	61	46	618	-15.2	5.3E+14	-17.04	-0.29
2011-04-20	58	34	281	-8.7	4.80E+14	-40.88	25.43	2012-07-01	180	87	477	8.8	4.2E+14	61.90	13.30
2011-05-12	61	42	286	5.5	4.00E+14	-40.87	24.61	2012-07-03	199	87	532	-4.6	1.3E+15	46.59	34.12
2011-05-13	353	39	166	2.8	4.10E+14	-0.49	26.18	2012-08-03	310	174	304	1.2	1.9E+15	29.73	-2.48
2011-05-18	17	57	577	12.2	8.50E+14	-35.75	44.20	2012-11-09	175	276	559	4	5E+15	74.35	35.97
2011-05-29	57	29	323	-0.6	3.50E+13	-17.01	10.76	2012-11-10	189	210	762	-9.9	1.2E+15	-49.36	58.43
2011-06-11	14	73	269	2.5	1.80E+15	-6.56	42.92	2012-11-13	134	29	538	-3.1	1.1E+14	-16.35	-24.26
2011-06-14	242	36	228	11.4	4.10E+13	27.74	-13.34	2012-11-13	119	119	797	-11	1E+15	-35.48	19.22
2011-06-21	10	58	423	10.5	4.00E+13	0.00	41.60	2012-11-14	113	94	478	-10.6	7.7E+14	-56.89	-29.47
2011-06-21	0	26	203	2.1	2.30E+13	-4.09	39.21	2012-11-14	141	25	507	-26	2.4E+14	64.70	73.49
2011-07-07	85	113	361	7.2	2.30E+15	-52.81	5.59	2012-11-21	360	360	920	-16.2	2.2E+15	-21.40	42.08
2011-07-09	153	35	270	-10.5	3.00E+13	-13.21	-26.11	2013-01-23	16	51	352	3.7	3E+14	32.90	36.78
2011-07-13	142	22	174	-3.9	1.70E+14	-18.07	-20.96	2013-01-23	48	26	641	-19.8	2.4E+14	1.76	41.30
2011-07-24	310	75	317	0.1	5.70E+15	43.27	52.20	2013-02-01	92	81	126	4.2	3.5E+15	13.42	-16.00
2011-07-27	63	66	680	8	3.10E+15	-42.22	35.78	2013-04-04	288	23	460	144	1.2E+12	21.29	1.09
2011-08-10	316	28	241	-21.4	3.40E+13	26.73	21.35	2013-04-20	303	22	230	2.2	3.6E+13	-12.04	-36.03
2011-08-12	296	24	517	97.9	1.50E+14	45.06	22.23	2013-05-20	272	70	176	5.6	5.6E+14	-4.24	6.49
2011-09-05	64	84	289	0.4	2.40E+15	-82.98	8.93	2013-05-22	270	210	687	16.8	3.1E+16	-62.00	42.44
2011-09-08	325	67	351	-2	9.60E+14	46.54	48.18	2013-06-25	27	91	562	15.1	2.3E+15	-7.39	10.40
2011-10-01	10	42	175	-10.5	1.10E+15	-4.96	26.13	2013-07-16	136	0	578	6.5	1.7E+15	-3.77	3.76
2011-10-02	16	57	262	2.5	2.60E+14	-4.52	36.89	2013-08-04	52	62	305	-3.9	3.7E+14	-34.17	45.38
2011-10-31	279	74	44	0.5	8.10E+14	22.42	-1.14	2013-09-19	115	174	362	-8.4	9E+14	-68.04	41.85
2011-11-01	351	71	303	-2.6	4.30E+14	6.63	36.10	2013-10-14	340	74	298	4.3	1.5E+15	6.34	-32.04
2011-11-01	276	25	240	-6.5	1.00E+14	30.11	3.02	2013-11-05	24	126	512	1.6	3.8E+15	25.09	-49.36
2011-11-05	13	38	555	13.6	9.70E+14	-20.96	36.26	2013-11-26	49	111	671	7.7	3.1E+15	34.87	26.43
2011-11-13	102	43	208	1.1	1.10E+14	-30.33	-8.78	2013-12-01	331	159	561	-9.8	1.9E+15	-16.10	-33.15
2011-12-01	59	46	327	6.8	2.70E+14	-22.61	14.54	2013-12-02	356	39	205	2.1	1.4E+14	3.64	-42.20
2011-12-11	72	57	398	-10.5	1.10E+15	-43.23	14.00	2014-04-01	360	360	247	15.4	2.7E+15	-61.28	-44.25
2011-12-25	329	254	577	-11.5	2.30E+15	6.59	52.68	2014-04-10	270	27	399	20.3	6.3E+13	-63.25	-44.76
2012-01-23	329	221	684	35.5	5.30E+15	38.49	34.65	2014-05-12	168	144	695	-0.2	5.4E+15	-38.42	-10.76
2012-02-05	13	52	442	20.8	4.80E+14	-13.08	44.42	2014-05-29	33	47	115	1.9	4.8E+14	-34.43	-37.89
2012-02-05	359	53	588	-8	8.20E+14	-2.07	45.92	2014-06-08	50	76	362	-10.4	1E+15	8.70	9.21
2012-02-05	272	65	167	3.7	2.40E+15	19.57	0.67	2014-06-25	41	35	260	18.7	4.5E+14	-17.03	45.61
2012-02-23	292	50	468	-8.5	2.30E+14	54.45	32.44	2014-07-01	51	74	343	0.7	5.9E+14	-1.98	26.30

Обозначения столбцов:

A — дата события; B — центральный позиционный угол KBM (в градусах); C — угловой размер KBM (в градусах); D — линейная проекционная скорость KBM (в км/с); E — ускорение KBM (в м/с²); F — масса KBM (в г); G — угол φ (в градусах); H — угол λ (в градусах).