

УДК 523.62-726

## ЭМПИРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ СКОРОСТЕЙ И ЗАПАЗДЫВАНИЙ МЕЖПЛАНЕТНЫХ КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАССЫ

© 2023 г. Н. С. Шлык<sup>1</sup>, \*, А. В. Белов<sup>1</sup>, М. А. Абунина<sup>1</sup>, А. А. Абунин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн  
им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Москва, Троицк, Россия

\*e-mail: nshlyk@izmiran.ru

Поступила в редакцию 21.02.2023 г.

После доработки 05.04.2023 г.

Принята к публикации 25.05.2023 г.

Исследуется поведение скорости межпланетных корональных выбросов массы в зависимости от геолодологии источника (ассоциированной солнечной вспышки), начальной скорости выброса и скорости фонового солнечного ветра. В основе моделирования лежат данные о 364 выбросах солнечного вещества, сопровождавшихся вспышками и наблюдавшихся в коронографе SOHO/LASCO, межпланетные аналоги которых были впоследствии зарегистрированы у Земли в период с 1995 по 2021 гг. Описана модель, позволяющая оценивать транзитную и максимальную скорости соответствующего межпланетного возмущения, а также время его прибытия к Земле. Средняя абсолютная ошибка оценки времени распространения межпланетных корональных выбросов массы для рассмотренных 364 событий составляет 11.5 ч, а средняя относительная ошибка – 16.5%.

DOI: 10.31857/S0016794023600175, EDN: GRVODM

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Корональные выбросы массы (КВМ) представляют собой типичные проявления солнечной активности, которые приводят к образованию межпланетных возмущений, оказывающих влияние, в том числе, и на Землю. Они часто становятся причиной развития геомагнитных бурь [Gosling et al., 1990; Tsurutani and Gonzalez, 1997; Zhang et al., 2003], и поэтому оценка скорости и времени распространения межпланетных возмущений, вызванных КВМ, является важным аспектом точного прогнозирования космической погоды.

Существует множество работ, посвященных исследованию самых разных свойств КВМ, начиная от изучения их солнечных источников и причин возникновения, эволюции в солнечной короне и заканчивая условиями распространения соответствующих возмущений в межпланетном пространстве и последствиями их прибытия к Земле [Gopalswamy et al., 2000; Webb and Howard, 2012; Zhang et al., 2021 и др.]. С появлением коронографов стала активно развиваться теория КВМ [Gosling et al., 1976; Lindsay et al., 1999; Yashiro et al., 2005 и др.]. Различные авторы указали на существование проекционных эффектов у коронографов, которые мешают точно определению скоростей и/или размеров КВМ особенно для центральных событий, и описали методы их коррекции [Vršnak et al., 2007; Temmer et al., 2009;

Raouris et al., 2021]. По данным коронографов были оценены размеры, массы и скорости различных КВМ, составлены каталоги КВМ и их межпланетных аналогов (МКВМ) и уточнены многие их свойства [Michalek et al., 2003; Richardson and Cane, 2010; Gopalswamy et al., 2010; Hess and Zhang, 2017; Lamy et al., 2019 и др.].

Правильная оценка скоростей распространения МКВМ осложняется из-за наличия взаимодействия со спокойным солнечным ветром (СВ). Gopalswamy et al. [2000], например, описали эффективное ускорение, действующее на МКВМ со стороны фонового СВ. В работах Cane et al. [2000] и Wang et al. [2002] показано, что транзитные скорости МКВМ, регистрируемые на Земле, лишь слабо коррелируют с начальными скоростями соответствующих КВМ. Возможное объяснение этому – существование взаимодействия с другими крупномасштабными возмущениями СВ: например, высокоскоростными потоками из корональных дыр или другими МКВМ [Gopalswamy, 2008; Lugaz et al., 2017; Шлык и др., 2021].

На данный момент разработано много разных моделей распространения МКВМ, учитывающие самые разные факторы: положение солнечного источника, начальная скорость и ширина КВМ, скорость фонового СВ, наличие других возмущений СВ и т.д. Среди них, например, магнитогидродинамические (МГД) модели распространения

возмущений СВ *WSA–ENLIL Solar Wind Prediction* (<https://www.swpc.noaa.gov/products/wsa-enlil-solar-wind-prediction>), или *ISWA Model* (<https://iswa.gsfc.nasa.gov/IswaSystemWebApp/>), а также другие сложные теоретические МГД-модели, описанные в работах Odstrcil [2003], Feng et al. [2010], Shen et al. [2007], Davies et al. [2012]; эмпирические и полуэмпирические модели *Graduated Cylindrical Shell (GCS) model* [Thernisien, 2011], *Effective Acceleration Model (EAM)* [Paouris and Mavromichalaki, 2017], *Drag-Based Ensemble Model (DBEM)* [Vršnak et al., 2013; Čalogović et al., 2021], модель Центра данных оперативного космического мониторинга МГУ (*SMDC*) [Shugay et al., 2022].

Время прибытия межпланетных возмущений к Земле может быть довольно точно оценено вышеупомянутыми аналитическими моделями. Например, Riley et al. [2018] показали, что существующие модели способны предсказать прибытие ударной волны от МКВМ с точностью  $\pm 10$  ч, однако они требуют большого количества входных параметров, значительных вычислительных мощностей и времени, и эти данные далеко не всегда оперативно доступны.

Наша группа постаралась максимально использовать солнечные данные, которые сопровождают генерацию КВМ (начальная скорость КВМ, оцененная по коронографу, и долгота его источника на солнечном диске), чтобы как можно более заблаговременно и точно оценивать скорость соответствующего МКВМ на пути от Солнца к Земле. Созданная нами эмпирическая модель (на основе данных о 288 КВМ, ассоциированных с солнечными вспышками за 1995–2020 гг.) подробно описана в работе Belov et al. [2022], дает возможность мгновенно оценить транзитную скорость, максимальную скорость во время прибытия к Земле и запаздывание для соответствующего МКВМ. Средняя ошибка определения времени распространения до Земли для рассмотренных событий оказалась равной 13.6 ч.

Однако существуют перспективы для улучшения вышеупомянутой модели. Цель настоящей работы – разработка усовершенствованной эмпирической модели оценки скоростей (транзитной и максимальной) и запаздывания МКВМ за счет расширения статистики событий, уточнения их характеристик и включения дополнительных входных параметров.

## 2. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Для исследования различных параметров КВМ использовались данные, собранные в онлайн-каталоге ([https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/)). Данные по МКВМ, достигшим Землю, собраны в базе данных Форбуш-эффектов и межпланетных возмущений (*Forbush Effects and Interplanetary Dis-*

*turbances* (FEID), (<https://tools.izmiran.ru/aid/>), созданной в ИЗМИРАН. В базе данных FEID содержатся различные характеристики межпланетной среды (скорость, температура, плотность СВ, величина межпланетного магнитного поля (ММП), плазменная бета и др.), космических лучей и геомагнитной активности во время различных межпланетных возмущений; сделаны привязки многих из этих возмущений к солнечным источникам (указаны параметры родительских вспышек, эрупций волокон и пр.); рассчитаны различные сопутствующие параметры. Параметры СВ и ММП взяты из базы данных OMNI (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/>), список ударных волн – <http://isgi.unistra.fr/datadownload.php>, вспышек – <https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-features/solar-flares/x-rays/goes/xrs/>.

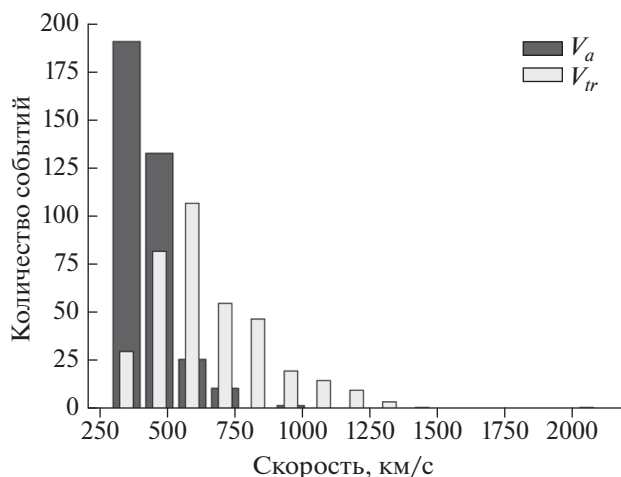
Из базы данных FEID мы выбирали события, вызванные приходом к Земле МКВМ, для которых есть уверенная привязка к солнечной вспышке, и соответствующий КВМ был виден в коронографе. Всего таких событий получилось 364, причем охвачен длительный период времени с 1995 по 2021 гг. Отметим, что межпланетных возмущений, привязанных к солнечным источникам в FEID, значительно больше, но мы не использовали те из них, которые были соотнесены с солнечными источниками с малой степенью уверенности или по которым, например, не было данных коронографа.

Полный каталог 364 исследуемых событий, содержащий как характеристики КВМ, так и характеристики вызванных ими межпланетных возмущений, зарегистрированных впоследствии у Земли, доступен по ссылке ([http://spaceweather.izmiran.ru/papers/2023/ICME\\_catalogue.pdf](http://spaceweather.izmiran.ru/papers/2023/ICME_catalogue.pdf)).

## 3. ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

В предыдущей работе [Belov et al., 2022] были использованы лишь два входных параметра – синус абсолютной гелиодолготы источника и начальная скорость КВМ, однако, очевидно, что учет скорости фонового СВ также важен, поскольку возможны различные сценарии взаимодействия с ним распространяющегося МКВМ: медленные выбросы могут ускоряться, а быстрые, наоборот, замедляться. На рис. 1 приведено распределение величин транзитных скоростей МКВМ ( $V_{tr}$ ) и скорости фонового СВ ( $V_a$ , за час до регистрации МКВМ у Земли). Хорошо видно, что величины скорости фонового СВ имеют гораздо более узкие интервалы изменения (от 263 до 970 км/с), а транзитные скорости МКВМ от события к событию могут меняться более, чем в 7 раз (от 286 до 2109 км/с).

Стоит отметить, что значение фоновой скорости СВ точно не известно на момент прогнозиро-



**Рис. 1.** Распределение величин транзитных скоростей КВМ ( $V_{tr}$ ) и скорости фонового СВ ( $V_a$ , за час до регистрации МКВМ у Земли).

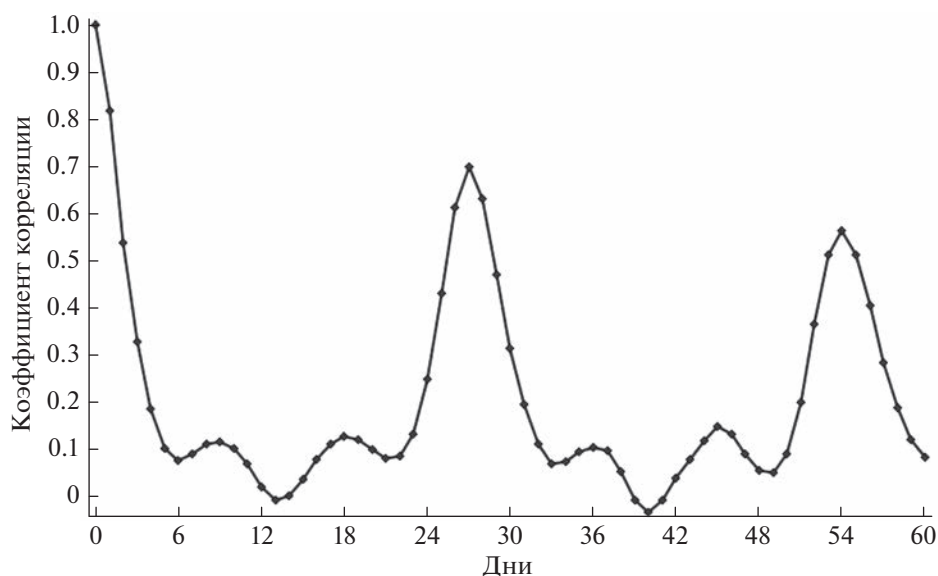
вания прихода МКВМ к Земле. Однако эти значения хорошо прогнозируются, поскольку значения скорости СВ, как правило, мало меняются в течение нескольких дней. На рис. 2 приведена автокорреляция среднесуточных значений скорости СВ в течение двух месяцев (точки получены усреднением данных за период 2007–2010 гг.). Видно, что эти значения в первые 3–4 дня (обычно этого промежутка достаточно для достижения МКВМ орбиты Земли) меняются день ото дня плавно, а возможный рост скорости фонового СВ (например, из-за воздействия высокоскоростного потока из корональной дыры) прогнозируется довольно точно, учитывая существование выраженной 27-дневной повторяемости.

Таким образом, основными входными параметрами для обновленной эмпирической модели оценки скоростей и запаздываний МКВМ были выбраны:

- начальная линейная скорость КВМ, рассчитанная по данным коронографа SOHO/LASCO –  $V_0$ ;
- синус абсолютной гелиодолготы, ассоциированной с КВМ солнечной вспышки –  $\sin \varphi$ ;
- скорость фонового СВ за час до регистрации соответствующего МКВМ у Земли –  $V_a$ .

На рис. 3 приведено распределение начальных скоростей КВМ ( $V_0$ ), вошедших в исследуемую выборку, в зависимости от синуса абсолютной величины долготы ассоциированной вспышки –  $\sin \varphi$ . Распределение оказывается довольно равномерным, несмотря на то, что событий с центральными источниками значительно больше, чем лимбовых. Это не должно удивлять, поскольку такие возмущения просто реже доходят до Земли и реже регистрируются. Можно заметить, что существует некий излом распределения в районе  $\sin \varphi = 0.7$ : среднее значение  $V_0$  для событий с долготами  $\varphi > 45^\circ$  составило  $1291 \pm 73$  км/с, а для событий с  $\varphi \leq 45^\circ$  всего  $852 \pm 27$  км/с. Это свидетельствует о том, что с более далеких гелиодолгот к Земле приходят межпланетные возмущения только от наиболее быстрых и мощных КВМ, причем в некоторых случаях (13 событий с  $\varphi = 90^\circ$ ) были зарегистрированы лишь ударные волны, тело выброса миновало Землю.

Следует отметить, что в некоторых случаях (для 12 событий) значения начальной скорости были скорректированы: для части медленных вы-



**Рис. 2.** Автокорреляция среднесуточных значений скорости СВ за период 2007–2010 гг.

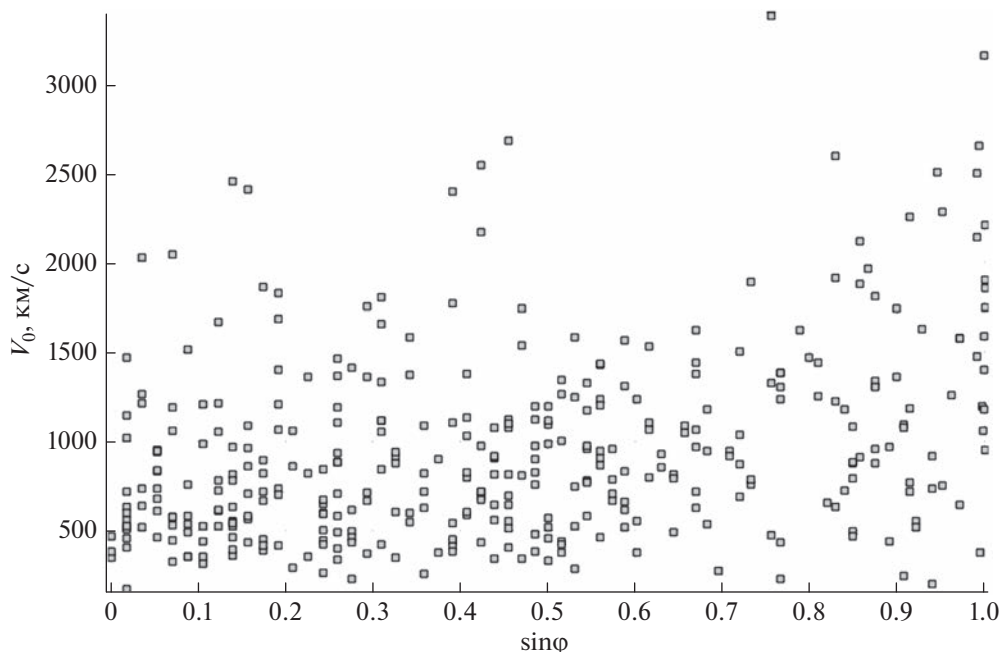


Рис. 3. Распределение начальных скоростей ( $V_0$ ) и синусов абсолютной долготы солнечного источника ( $\sin \phi$ ) для 364 КВМ, используемых в исследовании.

бросов в используемом каталоге ([https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/)) было указано, что их скорость на высоте 20 радиусов Солнца значительно больше, чем в начале. Поэтому, чтобы учесть нетипичное поведение этих КВМ, очевидно связанное с дополнительным ускорением по мере подъема в солнечной короне, мы решили в этих редких случаях использовать в качестве начальной “скорость второго порядка, рассчитанную на конечной высоте”, приведенную в том же каталоге.

На рис. 4 показано распределение начальных, фоновых и транзитных скоростей для исследуемых 364 событий, при этом изменение цвета точек от черного к белому соответствует изменению величин транзитной скорости от 300 до  $>1000$  км/с.

Естественно ожидать, что в некоторых событиях ожидаемая транзитная скорость и время распространения МКВМ будут близки к ранее наблюдавшимся событиям с аналогичными входными данными, а именно  $V_0$ ,  $\sin \phi$ ,  $V_a$ . Это означает, что мы можем использовать уже имеющиеся в нашей базе данных события для определения ожидаемой транзитной скорости и запаздывания для нового события, усредняя имеющуюся информацию в окрестности исследуемой точки. При этом учитывается вклад всех 364 точек, но так, чтобы ближайшие точки имели наибольший вес. Тогда величину ожидаемой транзитной скорости можно рассчитать следующим образом:

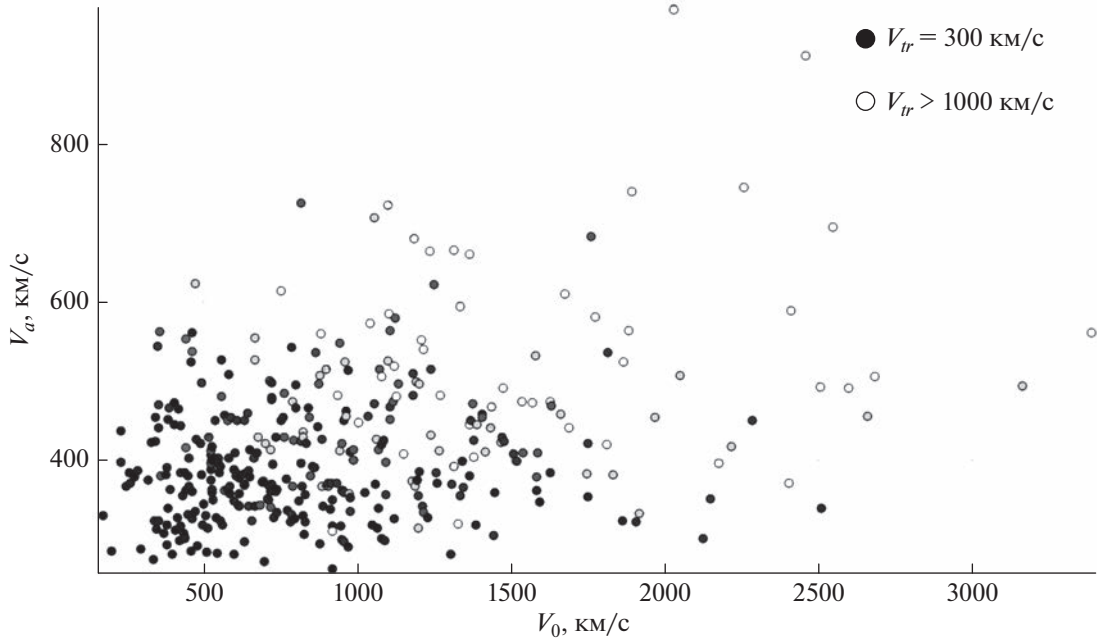
$$V_{tr} = \frac{\sum_{i=1}^N V_i w_i}{\sum_{i=1}^N w_i}, \quad (1)$$

где  $V_i$  – транзитная скорость  $i$ -го события в окрестности;  $w_i$  – вес  $i$ -го события в окрестности,  $N = 364$ .

При этом вес  $i$ -го события определяется как:

$$\begin{cases} w_i = \frac{s_0^2}{s_v^2 + s_p^2 + s_a^2 + s_0^2}, \text{ для } s_v \leq s_{vc}, \\ |s_p| \leq s_{pc}, \quad s_a \leq s_{ac}, \quad s_0 = s_{0c} \\ w_i = \left( \frac{s_0^2}{s_v^2 + s_p^2 + s_a^2 + s_0^2} \right)^2 \\ \text{для всех других значений } s_v, s_p, s_a, \end{cases} \quad (2)$$

где  $s_v = \left| 1 - \frac{V_0}{V_{0i}} \right|$ ;  $s_p = (\sin p - \sin \phi_i)$ ;  $\sin p$  – синус абсолютного значения гелиодолготы исследуемого события;  $V_0$  – начальная скорость КВМ исследуемого события;  $\sin \phi_i$  и  $V_{0i}$  – синус абсолютного значения гелиодолготы ассоциированной вспышки и начальная скорость  $i$ -го события в окрестности;  $s_a = \left| 1 - \frac{V_a}{V_{ai}} \right|$ ;  $V_a$  – скорость фонового СВ в исследуемом событии;  $V_{ai}$  – фоновая скорость СВ



**Рис. 4.** Распределение начальных ( $V_0$ , ось  $X$ ), фоновых ( $V_a$ , ось  $Y$ ) и транзитных скоростей ( $V_{tr}$ , изменение цвета от черного к белому соответствует изменению величин транзитной скорости от 300 до  $>1000$  км/с) для исследуемых 364 событий.

для  $i$ -го события в окрестности;  $s_0$  — задаваемая вручную величина, определяющая ближайшую окрестность, в которой веса меняются незначительно.

Значения величин  $s_{vc}, s_{pc}, s_{ac}, s_{0c}$  изменяются в зависимости от начальных скоростей КВМ. Подбор значений  $s_{vc}, s_{pc}, s_{ac}, s_{0c}$  и граничных условий для  $V_0$  был осуществлен исходя из достижения минимальных значений отклонения модельных величин транзитной скорости и времени от реально наблюдаемых в исследуемых 364 событиях. В табл. 1 представлены найденные условия и соответствующие им значения.

Ошибки скорости считаются аналогичным образом, как и сами транзитные скорости (с учетом веса), но вместо значения скоростей используются разности их прогнозируемого и наблюдаемого значения (по абсолютной величине).

Для равномерно расположенных по  $V_0$  (с шагом 50 км/с) и  $V_a$  (с шагом 20 км/с) узлов были рассчитаны матрицы ожидаемых значений тран-

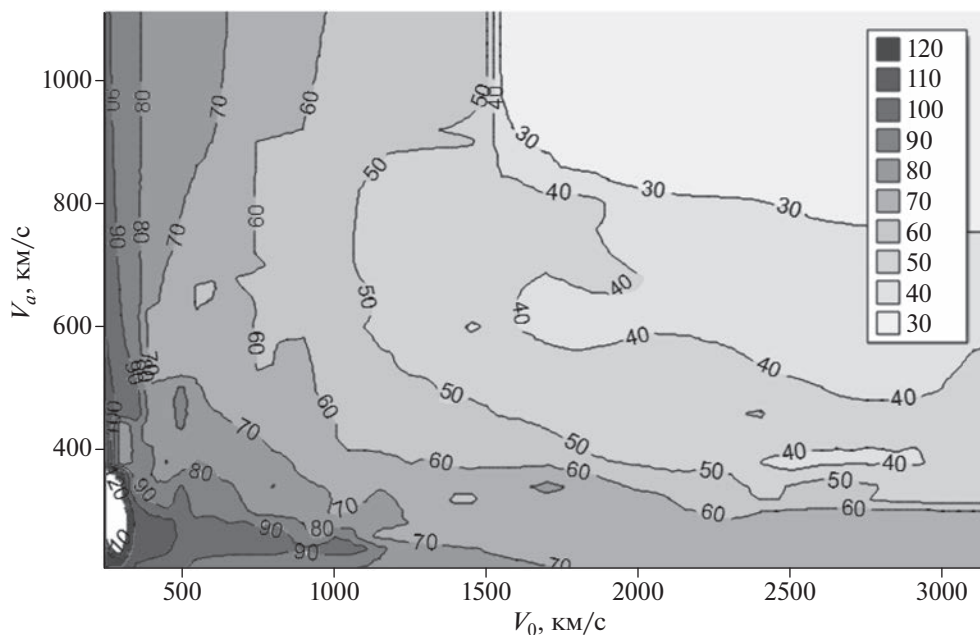
зитной скорости по формуле (1) и запаздывания МКВМ по формуле (3):

$$T_{tr} = \frac{1AU}{V_{tr}}. \tag{3}$$

Для более наглядной демонстрации данных мы воспользовались контурным представлением ожидаемых транзитных величин, построенным на основе вычисленных матриц. На рис. 5 приведена связь ожидаемого времени прибытия межпланетного возмущения к Земле ( $T_{tr}$ ) со значениями начальной скорости соответствующего КВМ (ось  $X$ ) и фоновой скорости СВ (ось  $Y$ ), более темными цветами обозначены меньшие запаздывания (числа, указанные на соответствующих изолиниях). Например, для КВМ с начальной скоростью 1500 км/с при фоновой скорости 400 км/с ожидаемое время прибытия составляет  $\sim 60$  ч, а для начальной скорости 500 км/с оно увеличивается до 80 ч. Также влияние оказывает и изменение фоновой скорости.

**Таблица 1.** Граничные условия и значения коэффициентов, используемых при расчете веса события по формуле (2)

Условия/значения	$s_{vc}$	$s_{pc}$	$s_{ac}$	$s_{0c}$
$V_0 < 450$ км/с	0.25	0.4	0.1	0.06
$450 \leq V_0 \leq 800$ км/с	0.4	0.2	0.2	0.08
$V_0 > 800$ км/с	0.4	0.4	0.2	0.06



**Рис. 5.** Связь ожидаемого запаздывания МКВМ ( $T_{tr}$ ) с начальной скоростью соответствующего КВМ (ось  $X$ ) и скоростью фонового СВ (ось  $Y$ ). Различным цветом обозначена градация ожидаемого транзитного времени по величине (в часах).

Нами также были получены зависимости ожидаемых транзитных скоростей ( $V_{tr}$ , ось  $Y$ ) от начальной скорости КВМ (разные кривые) и долготы ассоциированной с ним вспышки (ось  $X$ ) при заданной скорости фонового СВ (для примера взято значение  $V_a = 400$  км/с). По рис. 6 можно определить ожидаемые значения: например, для КВМ с начальной скоростью порядка 700 км/с ожидаемая транзитная скорость составляет  $\sim 600$  км/с, а для аналогичного КВМ с далеким по долготе источником ( $>50^\circ$ ) – получаем менее 550 км/с.

#### 4. ВЕРИФИКАЦИЯ И ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ

Мы имеем возможность для любой долготы, начальной и фоновой скоростей посчитать ожидаемую транзитную скорость, в частности, сделать это для тех событий, которые послужили основной выборкой для проведенного анализа. На рис. 7 представлены графики зависимости реально наблюдаемой скорости в исследуемых событиях и скорости, рассчитанной по модели (при условии исключения из расчета самой исследуемой точки). Даже если не вводить никаких ограничений, коэффициент корреляции для полной выборки (364 события) составляет  $cc = 0.82 \pm 0.03$ , что уже является хорошим результатом. При рассмотрении только сравнительно центральных событий корреляция улучшается, а для узкого центрального диапазона долгот ( $\varphi \leq 10^\circ$ ), КВМ из которых с наибольшей вероятностью ре-

гистрируются на Земле и представляют наибольшую опасность с точки зрения неблагоприятной космической погоды, для 88 событий получаем  $cc = 0.90 \pm 0.02$ .

Отметим также, что разработанная модель уже применяется в повседневной деятельности Центра прогнозов космической погоды ИЗМИРАН (<http://spaceweather.izmiran.ru/>). На рис. 8 представлен скриншот рабочей версии используемой программы для расчета транзитной и максимальной скоростей МКВМ, а также запаздывания, в основе которой лежит описанная выше модель. В левые окошки вносятся начальная скорость КВМ, фоновая скорость СВ и абсолютная гелиодолгота ассоциированной вспышки. В средних окошках программа выдает полученные в результате моделирования значения (с ошибками) транзитных скоростей и времени соответствующего МКВМ, а также его максимальную скорость у Земли. Правые окошки отражают 95%-й квартиль значений тех же расчетных величин.

Следует отметить, что оценка максимальной скорости, регистрируемой в событии у Земли, проводится на основе линейной регрессии значений двух скоростей: максимальная скорость в событиях исследуемой выборки очень хорошо коррелирует с транзитной скоростью ( $cc = 0.89 \pm 0.02$ ), поэтому проводимые оценки следует считать достоверными. Это важно, поскольку оценка именно максимальной скорости в событии необходима для более точного прогнозирова-

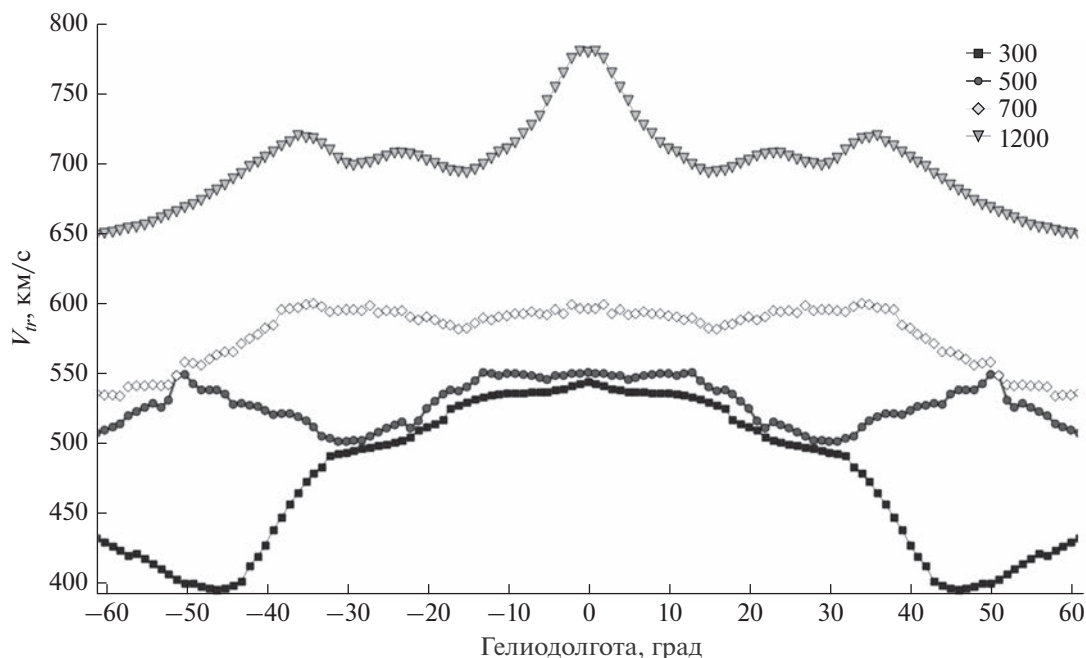


Рис. 6. Зависимость ожидаемых значений транзитной скорости (ось  $Y$ ) от долготы родительской вспышки (ось  $X$ ) и начальной скорости КВМ в км/с (кривые).

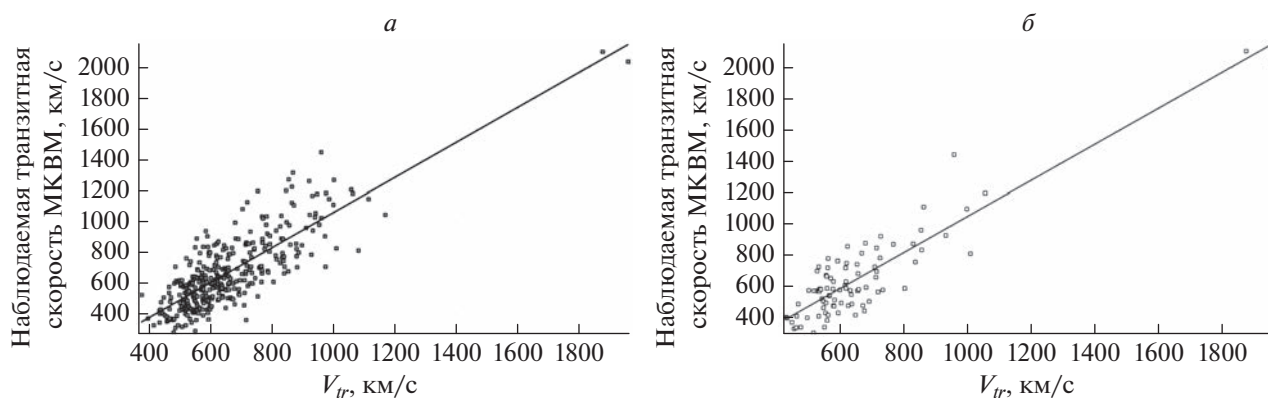


Рис. 7. Связь реально наблюдаемой транзитной скорости в исследуемых событиях и скорости, рассчитанной по модели  $a$ ) для всех 364 событий;  $b$ ) для 88 событий центральной долготной зоны ( $\varphi \leq 10^\circ$ ).

ния состояния космической погоды и величины возмущений в магнитосфере Земли.

На рис. 9 приведено распределение величин ошибки определения запаздывания МКВМ (положительные отклонения соответствуют задержке регистрации межпланетных возмущений по сравнению с прогнозом, а отрицательные, наоборот, дают события, в которых они были зарегистрированы раньше, чем ожидалось). Из гистограммы видно, что около 50% событий имеют ошибку в пределах  $\pm 10$  ч, а средняя абсолютная ошибка оценки времени прибытия составляет 11.5 ч. Для высокоскоростных центральных собы-

тий ( $V_0 > 800$  км/с и  $\varphi \leq 10^\circ$ ) это значение снижается до 8.6 ч.

Для сравнения отметим, что МГД-модели дают результаты с абсолютными ошибками 7 ч (<https://iswa.gsfc.nasa.gov/IswaSystemWebApp/>). Наши результаты более уместно сравнивать с другим типом моделей (эмпирическими или полуэмпирическими), эти модели имеют существенно большие погрешности: 14.5 ч (*DBEM*), 18.6 ч (*EAM*) или 20.8 ч (*SMDC*), поэтому использование нашей модели вполне оправдано.

Кроме того, полезно рассмотреть относительные величины ошибок определения времени

Прогнозирование средней скорости

Скорость КВМ  км/с

Фоновая скорость  км/с

Гелиодолгота  град

Транзитная скорость, км/с

95%

Запаздывание, ч

Максимальная скорость, км/с

Рис. 8. Скриншот программы для расчета скоростей и запаздывания МКВМ, в основе которой лежит описанная модель.

распространения МКВМ, поскольку величина ошибки в часах не во всех случаях дает правильное представление о ситуации. Например, если транзитное время некоторого межпланетного возмущения составляет 100 ч, то ошибка в  $\pm 10$  ч совершенно не критична, а если МКВМ относится к высокоскоростным, и время его распространения до Земли составляет 30–40 ч, то такое значение ошибки нельзя считать хорошим. Среднее

значение относительной ошибки для нашей модели составило 16.5%, поэтому оценки можно считать достаточно надежными как для быстрых, так и медленных МКВМ.

Приведем также примеры нескольких событий 2022 г., которые не вошли в исследуемую выборку, но представляли интерес для проверки нашей модели, поскольку имели разные начальные скорости и долготы солнечных источников и распространялись в отличающихся условиях межпланетной среды.

28 марта 2022 г. в 10:58 UT произошла вспышка класса M4.0 (N14W04), за которой в 12:00 UT последовала регистрация КВМ типа гало с начальной скоростью 702 км/с. У орбиты Земли приход соответствующего межпланетного возмущения был отмечен регистрацией ударной волны 31 марта в 01:41 UT. По оценкам нашей модели запаздывание для этого МКВМ (при выбранной скорости фонового СВ 400 км/с, поскольку в следующие 3 дня роста скорости СВ из-за других межпланетных возмущений не ожидалось) составляло 69 ч, т.е. время прибытия к Земле – 31 марта в 08:00 UT. Значение ожидаемой максимальной скорости составляло  $\sim 500$  км/с. Таким образом, ошибка определения транзитного времени в этом событии составила менее 7 ч, а значение максимальной скорости, зарегистрированной в этом

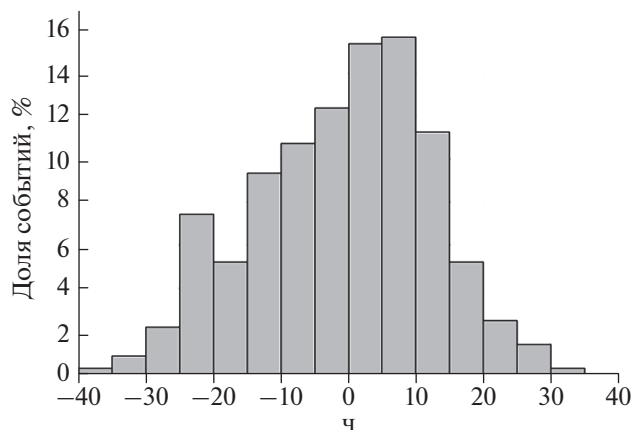


Рис. 9. Гистограмма величин ошибок определения запаздывания МКВМ для исследуемых 364 событий.



события, было  $\sim 560$  км/с, поэтому наши оценки можно считать достаточно надежными.

Два дня спустя первого упомянутого события, 30 марта 2022 г. в 17:21 UT на Солнце произошла еще одна большая вспышка класса X1.3 (N13W31), и в 18:00 UT было зарегистрировано КВМ с начальной скоростью 641 км/с. По оценкам нашей модели соответствующее межпланетное возмущение должно было достигнуть Земли 02 апреля около 07:00 UT с максимальной скоростью  $\sim 550$  км/с (при условии, что скорость фонового СВ из-за предыдущего межпланетного возмущения была повышенной, 500 км/с). Регистрация ударной волны произошла 02 апреля в 00:19 UT, а максимальная скорость составила  $\sim 580$  км/с. Т.е. в этом событии ошибка определения запаздывания МКВМ оказалась около 7 ч, и оценка максимальной скорости была вполне приемлемой.

Интересно также рассмотреть солнечное событие 13 июня 2022 г.: на Солнце в 02:58 UT была зарегистрирована вспышка класса M3.4 и в 03:12 UT ассоциированный с ней КВМ типа гало имел начальную скорость 1150 км/с. При этом двумя днями ранее центральный солнечный меридиан начала пересекать довольно протяженная трансэкваториальная корональная дыра, высокоскоростной поток из которой впоследствии воздействовал на околоземное космическое пространство 15–17 июня. По оценкам нашей модели (при выбранной фоновой скорости СВ, равной 550 км/с с учетом воздействия упомянутого высокоскоростного потока) соответствующее МКВМ должно было быть зарегистрировано у Земли спустя 52 ч, т.е. 15 июня около 07:00 UT с максимальной скоростью  $\sim 630$  км/с. Регистрация межпланетного возмущения произошла 15 июня около 05:00 UT, максимальная скорость в событии составила  $\sim 610$  км/с, поэтому можно заключить, что наши оценки были верны и в этом случае.

## 5. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Было рассмотрено и проанализировано 364 КВМ, ассоциированных с солнечными вспышками и зарегистрированных на коронографе SOHO/LASCO, межпланетные возмущения от которых впоследствии наблюдались в околоземном космическом пространстве.

Установлено, что величины транзитной скорости и запаздывания МКВМ зависят от начальной скорости соответствующего КВМ, абсолютной долготы ассоциированной солнечной вспышки, а также скорости фонового СВ. Обсуждены поправки к начальным значениям скорости медленных событий и возможности оценки значений фоновой скорости СВ. Показано, что транзитная скорость МКВМ в исследуемой выборке тесно

связана с максимальной скоростью, регистрируемой у Земли.

На основе установленных закономерностей создана модель, которая позволяет оценить транзитную и максимальную скорости МКВМ, а также время прибытия его к Земле. Разработанная модель успешно применяется в прогнозировании состояния космической погоды.

В дальнейшем планируется расширить статистику, используемую в модели, провести работу по повышению качества проводимых оценок, добавить возможность прогнозирования ожидаемого уровня геомагнитной активности. Кроме того, стоит более внимательно рассмотреть события в разные фазы солнечного цикла, поскольку изменение состояния гелиосферы оказывает значительное влияние на распространение межпланетных возмущений. Также планируется совместить созданную модель с моделью вероятности прихода МКВМ, что улучшит наши оценки для событий с большими долготами солнечных источников.

Отметим еще раз, что все полученные результаты относятся не ко всем КВМ, а только к тем, которые были достоверно идентифицированы по коронографическим данным, и соответствующие им МКВМ достигли Земли. Но, тем не менее, возможно и более широкое применение нашей модели, например, для решения обратной задачи: оценки начальных скоростей КВМ по зарегистрированным временам запаздывания, для случаев, когда данные коронографа отсутствовали или были недостоверны.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Н.С. Шлык, А.В. Белов, М.А. Абунина и А.А. Абунин поддержаны грантом Российского научного фонда № 20-72-10023.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Шлык Н.С., Белов А.В., Абунина М.А., Абунин А.А., Оленева В.А., Янке В.Г. Влияние взаимодействующих возмущений солнечного ветра на вариации галактических космических лучей // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 61. № 6. С. 694–703. 2021. <https://doi.org/10.31857/S0016794021060134>
- Belov A., Shlyk N., Abunina M., Abunin A., Papaioannou A. Estimating the transit speed and time of arrival of interplanetary coronal mass ejections using CME and solar flare data // Universe. V. 8. I. 6. Article ID 327. 2022. <https://doi.org/10.3390/universe8060327>
- Čalogović J., Dumbović M., Vršnak B., Sudar D., Martinić K., Temmer M., Veronig A. Probabilistic Drag-Based Ensemble Model (DBEM) evaluation for heliospheric propagation of CMEs // Solar Phys. V. 296. Article ID 114. 2021. <https://doi.org/10.1007/s11207-021-01859-5>
- Cane H.V., Richardson I.G., St. Cyr O.C. Coronal mass ejections, interplanetary ejecta and geomagnetic storms // Geophys. Res. Lett. V. 27. № 21. P. 3591–3594. 2000.

- *Davies J.A., Harrison R.A., Perry C.H. et al.* A self-similar expansion model for use in solar wind transient propagation studies // *Astrophys. J.* V. 750. № 1. Article ID 23. 2012. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/750/1/23>
- *Feng X., Yang L., Xiang C., Wu S.T., Zhou Y., Zhong D.* Three-dimensional Solar WIND modeling from the Sun to Earth by a SIP-CESE MHD model with a six-component grid // *Astrophys. J.* V. 723. № 1. P. 300–319. 2010. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/723/1/300>
- *Gopalswamy N., Lara A., Lepping R.P., Kaiser M.L., Berdichevsky T.M., St. Cyr O.C.* Interplanetary acceleration of coronal mass ejections // *Geophys. Res. Lett.* V. 27. № 2. P. 145–148. 2000. <https://doi.org/10.1029/1999GL003639>
- *Gopalswamy N.* Solar connections of geoeffective magnetic structures // *J. Atm. Solar-Terr. Phys.* V. 70. P. 2078–2100. 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2008.06.010>
- *Gopalswamy N., Yashiro S., Michalek G., Xie H., Mäkelä P., Vourlidas A., Howard R.A.* A Catalog of Halo Coronal Mass Ejections from SOHO // *Sun and Geosphere.* V. 5. № 1. P. 7–16. 2010.
- *Gosling J. T., Hildner E., MacQueen R.M., Munro R.H., Poland A.L., Ross C.L.* The speeds of coronal mass ejection events // *Solar Phys.* V. 48. P. 389–397. 1976. <https://doi.org/10.1007/BF00152004>
- *Gosling J.T., Bame S.J., McComas D.J., Phillips J.L.* Coronal mass ejections and large geomagnetic storms // *Geophys. Res. Lett.* V. 17. I. 7. P. 901–904. 1990. <https://doi.org/10.1029/GL017i007p00901>
- *Hess P., Zhang J.* A study of the Earth-affecting CMEs of solar cycle 24 // *Solar Phys.* V. 292. Article number 80. 2017. <https://doi.org/10.1007/s11207-017-1099-y>
- *Lamy P.L., Floyd O., Boclet B., Wojak J., Gilardy H., Barlyaeva T.* Coronal mass ejections over solar cycles 23 and 24 // *Space Sci. Rev.* V. 215. Article number 39. 2019. <https://doi.org/10.1007/s11214-019-0605-y>
- *Lindsay G.M., Luhmann J.G., Russell C.T., Gosling J.T.* Relationships between coronal mass ejection speeds from coronagraph images and interplanetary characteristics of associated interplanetary coronal mass ejections // *J. Geophys. Res.* V. 104. № A6. P. 12515–12523. 1999.
- *Lugaz N., Temmer M., Wang Y., Farrugia C.J.* The interaction of successive coronal mass ejections: a review // *Solar Phys.* V. 292. Article number 64. 2017. <https://doi.org/10.1007/s11207-017-1091-6>
- *Michalek G., Gopalswamy N., Yashiro S.* A new method for estimating widths, velocities, and source location of halo coronal mass ejections // *Astrophys. J.* V. 584. P. 472–478. 2003. <https://doi.org/10.1086/345526>
- *Odstrcil D.* Modeling 3-D solar wind structure // *Adv. Space Res.* V. 32. № 4. P. 497–506. 2003. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(03\)00332-6](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(03)00332-6)
- *Paouris E., Mavromichalaki H.* Effective Acceleration Model for the arrival time of interplanetary shocks driven by coronal mass ejections // *Solar Phys.* V. 292. Article number 180. 2017. <https://doi.org/10.1007/s11207-017-1212-2>
- *Paouris E., Vourlidas A., Papaioannou A., Anastasiadis A.* Assessing the projection correction of coronal mass ejection speeds on time-of-arrival prediction performance using the Effective Acceleration Model // *Space Weather.* V. 19. I. 2. e2020SW002617. 2021. <https://doi.org/10.1029/2020SW002617>
- *Richardson I.G., Cane H.V.* Near-Earth interplanetary coronal mass ejections during solar cycle 23 (1996–2009): catalog and summary of properties // *Solar Phys.* V. 264. P. 189–237. 2010. <https://doi.org/10.1007/s11207-010-9568-6>
- *Riley P., Mays M.L., Andries J. et al.* Forecasting the arrival time of coronal mass ejections: analysis of the CCMC CME scoreboard // *Space Weather.* V. 16. P. 1245–1260. 2018. <https://doi.org/10.1029/2018SW001962>
- *Shen F., Feng X., Wu S. T., Xiang C.* Three-dimensional MHD simulation of CMEs in three-dimensional background solar wind with the self-consistent structure on the source surface as input: Numerical simulation of the January 1997 Sun-Earth connection event // *J. Geophys. Res.* V. 112. A06109. 2007. <https://doi.org/10.1029/2006JA012164>
- *Shugay Y., Kalegaev V., Kaportseva K., Slemzin V., Rodkin D., Ereemeev V.* Modeling of solar wind disturbances associated with coronal mass ejections and verification of the forecast results // *Universe.* V. 8. I. 11. Article ID 565. 2022. <https://doi.org/10.3390/universe8110565>
- *Temmer M., Preiss S., Veronig A.M.* CME projection effects studied with STEREO/COR and SOHO/LASCO // *Solar Phys.* V. 256. P. 183–199. 2009. <https://doi.org/10.1007/s11207-009-9336-7>
- *Thernisien A.* Implementation of the Graduated Cylindrical Shell Model for the three-dimensional reconstruction of coronal mass ejections // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* V. 194. № 2. Article number 33. 2011. <https://doi.org/10.1088/0067-0049/194/2/33>
- *Tsurutani B.T., Gonzalez W.D.* The Interplanetary causes of magnetic storms: A review. Eds. Tsurutani B.T., Gonzalez W.D., Kamide Y., Arballo J. K. *Geophys. Monogr. Ser. / Wash. DC Am. Geophys. Union.* P. 77–89. 1997. <https://doi.org/10.1029/GM098p0077>
- *Vršnak B., Sudar D., Ružđak D., Žic T.* Projection effects in coronal mass ejections. // *Astron. Astrophys.* V. 469. P. 339–346. 2007. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20077175>
- *Vršnak B., Žic T., Vrbanec D. et al.* Propagation of interplanetary coronal mass ejections: the drag-based model // *Solar Phys.* V. 28. P. 295–315. 2013. <https://doi.org/10.1007/s11207-012-0035-4>
- *Wang Y. M., Yee P. Z., Wang S., Zhou G. P., Wang J.* A statistical study on the geoeffectiveness of Earth-directed coronal mass ejections from March 1997 to December 2000 // *J. Geophys. Res. – Space.* V. 107. № A11. Article ID 1340. 2002. <https://doi.org/10.1029/2002JA009244>
- *Webb D.F., Howard T.A.* Coronal mass ejections: observations // *Living Rev. Sol. Phys.* V. 9. Article number 3. 2012. <https://doi.org/10.12942/lrsp-2012-3>
- *Yashiro S., Gopalswamy N., Akiyama S., Michalek G., Howard R.A.* Visibility of coronal mass ejections as a function of flare location and intensity // *J. Geophys. Res.* V. 110. Article ID A12S05. 2005. <https://doi.org/10.1029/2005JA011151>
- *Zhang J., Dere K.P., Howard R.A., Bothmer V.* Identification of solar sources of major geomagnetic storms between 1996 and 2000 // *Astrophys. J.* V. 582. P. 520–533. 2003. <https://doi.org/10.1086/344611>
- *Zhang J., Temmer M., Gopalswamy N. et al.* Earth-affecting solar transients: A review of progresses in solar cycle 24 // *Prog. Earth Planet. Sci.* V. 8. Article number 56. 2021. <https://doi.org/10.1186/s40645-021-00426-7>