

## ОЦЕНКА ТРАНЗИТНОЙ СКОРОСТИ И ВРЕМЕНИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАССЫ ПО СОЛНЕЧНЫМ ДАННЫМ

**Н.С. Шлык, А.В. Белов, М.А. Абунина, А.А. Абунин**

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Москва, Троицк, Россия  
nshlyk@izmiran.ru

## ESTIMATING THE TRANSIT SPEED AND TIME OF ARRIVAL OF INTERPLANETARY CORONAL MASS EJECTIONS, USING SOLAR DATA

**N.S. Shlyk, A.V. Belov, M.A. Abunina, A.A. Abunin**

Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS, Troitsk, Moscow, Russia  
nshlyk@izmiran.ru

**Аннотация.** Исследуется изменение скорости межпланетных корональных выбросов массы (КВМ) с учетом начальной скорости родительского КВМ и гелиодолготы ассоциированной с ним вспышки за период с 1995 по 2020 г. Получены долготные зависимости ожидаемых транзитных величин при различных начальных скоростях КВМ на основе данных о 288 КВМ, связанных с солнечными вспышками. Создана модель, позволяющая оценивать транзитную и максимальную скорости, а также время прибытия соответствующего межпланетного возмущения к Земле, основываясь на данных о начальной скорости КВМ и долготе его солнечного источника.

**Ключевые слова:** корональные выбросы массы, солнечные вспышки, транзитная скорость, время распространения межпланетных возмущений.

**Abstract.** We studied variation in the transit speed of interplanetary coronal mass ejections (ICMEs), as well as its dependence on initial speed of corresponding coronal mass ejection (CME) and the heliolongitude of the associated solar flare from 1995 to 2020. Longitudinal dependences of expected transit quantities are obtained for various initial CME speeds, using data on 288 CMEs associated with solar flares. We created the model to estimate the transit and maximum speeds and the time of arrival of an ICME at Earth, based on the initial CME speed and the longitude of its solar source.

**Keywords:** coronal mass ejections, solar flares, transit velocity, time of arrival of interplanetary disturbances.

### ВВЕДЕНИЕ

Корональные выбросы массы (КВМ) представляют собой типичные проявления солнечной активности, которые приводят к образованию межпланетных возмущений (МВ), регистрируемых и на Земле. Приход подобных МВ часто вызывает геомагнитные бури [Tsurutani, Gonzalez, 1998; Zhang et al., 2003], поэтому оценка транзитной скорости и времени прибытия межпланетных КВМ важна для прогнозирования космической погоды.

Существует множество работ, посвященных исследованию положения солнечных источников КВМ, оценке наблюдаемых на коронографах скоростей, условий распространения КВМ в межпланетном пространстве и прибытия на Землю [Gosling et al., 1976; Cane et al., 2000; Vršnak, Žic, 2007; Gopalswamy et al., 2001; Suresh et al., 2022]. На данный момент разработаны разные модели распространения КВМ, например, ISWA Model [<https://iswa.gsfc.nasa.gov/IswaSystemWebApp>], Drag-Based Ensemble Model (DBEM) [Čalogović et al., 2021] и другие. Время прибытия МВ к Земле может быть довольно точно оценено вышеупомянутыми аналитическими моделями, однако они требуют большого количества входных параметров, а также больших вычислительных мощностей и времени. Предлагаемая нами эмпирическая модель позволяет делать мгновенные оценки транзитной и максимальной скоростей КВМ и времени его прибытия к Земле, используя легкодоступные солнечные данные (начальная скорость КВМ и положение его источника на солнечном диске), благодаря чему является незаменимым инструментом в повседневной практике нашего Центра прогнозов космической погоды [<http://spaceweather.izmiran.ru/ru/index.html>].

### ДААННЫЕ И МЕТОДЫ

Для исследования различных параметров КВМ мы использовали данные коронографа SOHO [[https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list)]. Данные по МВ, достигшим Земли, и их сопутствующим характеристикам собраны в базе данных форбуш-эффектов и межпланетных возмущений (FEID) [<http://spaceweather.izmiran.ru/eng/dbs.html>], созданной и поддерживаемой ИЗМИРАН. Часовые данные по солнечному ветру (СВ) и межпланетного магнитного поля (ММП) взяты из базы данных OMNI [<https://omniweb.gsfc.nasa.gov>]. Списки ударных волн и вспышек доступны по адресам соответственно [[http://isgi.unistra.fr/data\\_download.php](http://isgi.unistra.fr/data_download.php); <https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-features/solar-flares/x-rays/goes/xrs>].

Исследуемая группа событий ограничивается довольно строгими рамками: это КВМ, которые видны при наблюдении на коронографе и с уверенностью отождествлены с МВ у Земли и для которых имеются координаты ассоциированной вспышки. Отметим, что процессу установления связи «вспышка — КВМ — МВ у Земли» уделяется особое внимание, проводится анализ всех доступных источников информации. Всего таких событий получилось 288 за период 1995–2020 гг. Полный каталог событий доступен по ссылке [[http://spaceweather.izmiran.ru/papers/2022/CME\\_Catalogue.pdf](http://spaceweather.izmiran.ru/papers/2022/CME_Catalogue.pdf)].

### МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ТРАНЗИТНОЙ СКОРОСТИ И ВРЕМЕНИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КВМ

На рис. 1 приведено распределение начальных скоростей КВМ  $V_0$ , вошедших в исследуемую выборку,

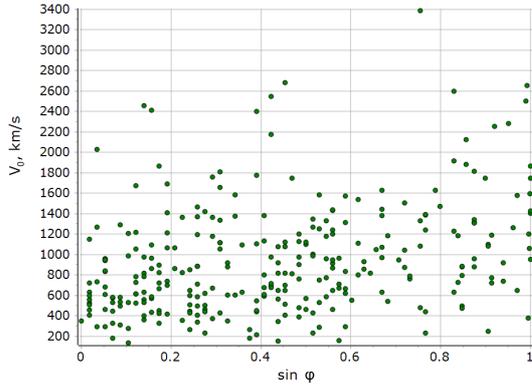


Рис. 1. Распределение начальных скоростей КВМ в зависимости от синуса абсолютной гелиодолготы источника для исследуемой выборки (288 событий)

в зависимости от синуса абсолютной величины долготы  $\phi$  родительской вспышки. Распределение получилось довольно равномерным, и полученные зависимости оказались симметричны для восточного и западного полушария, именно поэтому в дальнейшем используется абсолютная величина гелиодолготы и ее синус.

Хорошо известно, что  $V_0$  во многом определяет транзитную скорость соответствующего межпланетного КВМ  $V_{tr}$  [Belov et al., 2014]. Для нашей выборки из 288 событий эта связь также имеется ( $cc=0.64 \pm 0.04$  для линейной регрессии), но не тесная. В работах Gopalswamy et al. [2000] и Vršnak, Žic [2007] было показано, что связь транзитной и начальной скоростей КВМ нелинейная. Зависимость  $V_{tr}(V_0)$  с учетом возможной нелинейности для медленных КВМ, которые «подхватываются» фоновым СВ, может быть представлена в виде

$$V_{tr} = \begin{cases} V_c, & \text{для } V_0 \leq V_c \\ A + BV_0, & \text{для } V_0 > V_c \end{cases}, \quad (1)$$

где  $V_c$  — скорость отсечения. Были рассмотрены разные значения скорости отсечения, для  $V_c=520$  км/с были получены наименьшие дисперсии на разных долготных интервалах. Зависимость  $V_{tr}(V_0)$  меняется с долготой: чем больше  $\phi$ , тем меньше величина регрессионного коэффициента  $B$ . Но нелинейность в диапазоне малых скоростей существенна только для центральных событий.

Итак, время и скорость прибытия МВ на Землю зависят не только от начальной скорости соответствующего КВМ, но и от долготы его источника. Чтобы определить возможную транзитную скорость нового МВ, можно использовать события из FEID, усредняя уже имеющуюся информацию в окрестностях, близких к параметрам исследуемой точки. Тогда транзитная скорость может быть рассчитана:

$$V_{tr} = \frac{\sum_{i=1}^N V_i w_i}{\sum_{i=1}^N w_i}, \quad (2)$$

где  $V_i$  — транзитная скорость  $i$ -го события в окрестности,  $w_i$  — удельный вес  $i$ -го события в окрестности,  $N=288$ .

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

$$\begin{cases} w_i = \frac{1}{s_v^2 + s_p^2 + s_0^2}, & \text{для } s_v \leq s_{vc} \text{ и } |s_p| \leq 0.4 \\ w_i = 0, & \text{для других значений } s_v \text{ и } s_p \end{cases}, \quad (3)$$

причем  $s_v = \left| \frac{1-V}{V_{0i}} \right|$ ,  $s_p = (\sin p - \sin \phi_i)$ , где  $\sin p$  —

синус гелиодолготы источника исследуемой точки;  $V$  — начальная скорость исследуемого КВМ;  $\sin \phi_i$  и  $V_{0i}$  — синус гелиодолготы ассоциированной вспышки и начальная скорость  $i$ -го КВМ в окрестности;  $s_{vc}=1$  для  $V \leq 300$  км/с и  $s_{vc}=0.5$  для  $V > 300$  км/с,  $s_0$  — задаваемая вручную величина, которая определяет ближайшую окрестность, где веса практически не меняются (по умолчанию равная 0.1). Ошибки скорости считаются аналогичным образом, как и сами скорости (с учетом веса), но вместо значения скорости берется разность прогнозируемой и наблюдаемой скоростей (по абсолютной величине).

Для равномерно расположенных по скорости (с шагом 50 км/с) и  $\sin \phi$  (с шагом 0.02) узлов были рассчитаны матрицы ожидаемых значений транзитных скорости и времени и их статистических погрешностей. Для этого в каждом узле рассчитывались величины  $V_{tr}$  по формуле (1) и времени распространения МВ по формуле

$$T_{tr} = \frac{1AU}{V_{tr}}. \quad (4)$$

На основе вычисленных матриц данных нами были также получены контурные представления ожидаемых значений транзитной скорости (рис. 2, а) и времени распространения МВ (рис. 2, б) в зависимости от  $V_0$  и  $\sin \phi$ . По этим рисункам можно оценить интервал ожидаемых  $V_{tr}$  и  $T_{tr}$  (числа, указанные на соответствующих изолиниях) для конкретных значений начальной скорости КВМ и долготы ассоциированной вспышки.

Имея вычисленные матрицы данных, мы также посчитали ожидаемые  $V_{tr}$  для тех точек, которые изначально послужили основной выборкой. Коэффициент корреляции для всей выборки (288 событий)  $cc=0.8 \pm 0.035$ , а для центральных событий ( $\phi < 10^\circ$ , 64 события) —  $cc=0.9 \pm 0.055$ . Среднее абсолютное отклонение времени распространения межпланетного КВМ для созданной модели составляет 11.6 ч. Заметим, что созданная модель позволяет оценить не только транзитную, но и максимальную скорость в МВ у Земли. Установлено, что максимальная скорость в событиях исследуемой выборки очень хорошо коррелирует с транзитной скоростью ( $cc=0.89$ ) в случае линейной регрессии, поэтому проводимые оценки можно считать достоверными.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Было рассмотрено и проанализировано 288 КВМ, зарегистрированных на коронографе SOHO/LASCO и ассоциированных с солнечными вспышками, которые вызвали МВ, наблюдавшиеся в околоземном космическом пространстве. Показано, что связь транзитной скорости МВ и начальной скорости КВМ нелинейна в области малых скоростей, что подтверж-

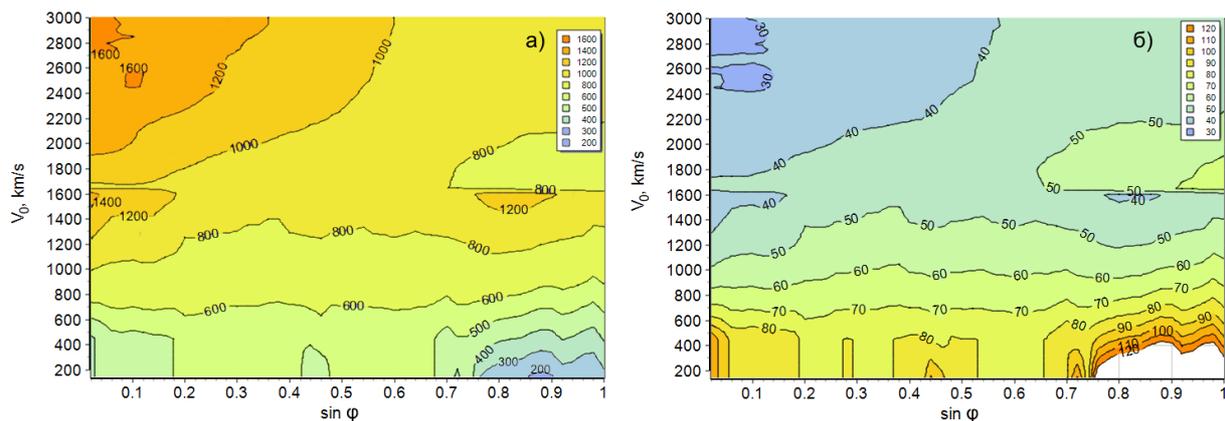


Рис. 2. Связь ожидаемых транзитной скорости (а) и времени распространения МВ (б) с начальной скоростью КВМ и синусом гелиодолготы его источника. Различными цветами обозначена градация ожидаемых транзитных характеристик по величине

дает результаты, отраженные в прошлых работах, например, [Gopalswamy et al., 2000]. Выявленная нелинейность наиболее выражена для КВМ из центральной гелиодолготной зоны. Установлено, что транзитная скорость и время прибытия МВ на Землю зависят от начальной скорости КВМ и абсолютной долготы ассоциированной солнечной вспышки. Показано, что транзитная скорость МВ в исследуемой выборке тесно связана с максимальной скоростью, наблюдаемой на Земле. Создана модель, которая позволяет оценить транзитные скорость/время и максимальную скорость МВ у Земли на основе начальной скорости КВМ и гелиодолготы ассоциированной с ним вспышки. Полученные результаты применяются в прогнозировании состояния космической погоды.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Belov A., Abunin A., Abunina M., et al. Coronal mass ejections and non-recurrent Forbush decreases. *Solar Phys.* 2014. Vol. 289. P. 3949–3960.

Čalogović J., Dumbović M., Sudar D., et al. Probabilistic Drag-Based Ensemble Model (DBEM) evaluation for heliospheric propagation of CMEs. *Solar Phys.* 2021. Vol. 296, iss. 7, article id.114.

Cane H.V., Richardson I.G., St. Cyr O.C. Coronal mass ejections, interplanetary ejecta and geomagnetic storms. *Geophys. Res. Lett.* 2000. Vol. 27, iss. 21. P. 3591–3594.

Gopalswamy N., Lara A., Howard R.A., et al. Predicting the 1-AU arrival times of coronal mass ejections. *J. Geophys. Res.* 2001. Vol. 106, iss. A12. P. 29207–29217.

Gopalswamy N., Lara A., Lepping R.P., et al. Interplanetary acceleration of coronal mass ejections. *Geophys. Res. Lett.* 2000. Vol. 27, iss. 2. P. 145–148.

Gosling J.T., Hildner E., MacQueen R.M., et al. The speeds of coronal mass ejection events. *Solar Phys.* 1976. Vol. 48. P. 389–397.

Suresh K., Gopalswamy N., Shanmugaraju A. Arrival Time Estimates of Earth-Directed CME-Driven Shocks. *Solar Phys.* 2022. Vol. 97, article number 3.

Tsurutani B.T., Gonzalez W.D. The Interplanetary Causes of Magnetic Storms: A Review. *Magnetic Storms*. Washington: AGU, 1998. P. 77–89. (Geophys. Monogr. Ser., vol. 98).

Vršnak B., Žic T. Transit times of interplanetary coronal mass ejections and the solar wind speed. *Astron. Astrophys.* 2007. Vol. 472. P. 937–943.

Zhang J., Dere K.P., Howard R.A., Bothmer V. Identification of Solar Sources of Major Geomagnetic Storms between 1996 and 2000. *Astrophys. J.* 2003. Vol. 582, iss. 1. P. 520–533.

URL: <https://iswa.gsfc.nasa.gov/IswaSystemWebApp> (дата обращения 19 мая 2022 г.).

URL: <http://spaceweather.izmiran.ru/ru/index.html> (дата обращения 19 мая 2022 г.).

URL: [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list) (дата обращения 18 мая 2022 г.).

URL: <http://spaceweather.izmiran.ru/eng/dbs.html> (дата обращения 19 мая 2022 г.).

URL: <https://omniweb.gsfc.nasa.gov> (дата обращения 15 мая 2022 г.).

URL: [http://isgi.unistra.fr/data\\_download.php](http://isgi.unistra.fr/data_download.php) (дата обращения 10 мая 2022 г.).

URL: <https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-features/solar-flares/x-rays/goes/xrs> (дата обращения 10 мая 2022 г.).

URL: [http://spaceweather.izmiran.ru/papers/2022/CME\\_Catalogue.pdf](http://spaceweather.izmiran.ru/papers/2022/CME_Catalogue.pdf) (дата обращения 19 мая 2022 г.).