

УДК 550.385

ПРОГНОЗ КВАЗИСТАЦИОНАРНЫХ И ТРАНЗИЕНТНЫХ ПОТОКОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ СОЛНЦА В 2010 г.

© 2021 г. Ю. С. Шугай^{1, *}, К. Б. Капорцева^{1, 2, **}

¹Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (НИИЯФ МГУ), г. Москва, Россия

²Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

*e-mail: jshugai@srd.sinp.msu.ru

**e-mail: kb.kaportceva@physics.msu.ru

Поступила в редакцию 20.03.2020 г.

После доработки 30.07.2020 г.

Принята к публикации 24.09.2020 г.

В работе представлены результаты прогноза скорости квазистационарных и транзиентных потоков солнечного ветра за период с мая по декабрь 2010 года. Скорость квазистационарных потоков солнечного ветра на околоземной орбите рассчитывались с помощью эмпирической модели на основе анализа изображений солнечной короны, полученных в вакуумном ультрафиолете. Скорость и время прихода межпланетных корональных выбросов масс прогнозировались *Drag Based*-моделью. Результаты прогноза скорости квазистационарных потоков солнечного ветра использовались в качестве параметра среды, по которой распространяются и с которой взаимодействуют транзиентные потоки. За период май–декабрь 2010 года было отобрано 94 корональных выброса масс из баз данных, пополняющихся в режиме близком к реальному времени. Анализ результатов прогноза показал, что у 67% из отобранных межпланетных корональных выбросов масс спрогнозированная скорость была менее 400 км/с, а 96% из них связаны со спокойной геомагнитной обстановкой ($Dst > -30$ нТл). Добавление прогноза межпланетных корональных выбросов масс к прогнозу квазистационарных потоков солнечного ветра улучшает качество прогноза. За период с мая по декабрь 2010 года среднеквадратичное отклонение между измеренными на космическом аппарате *ACE* и спрогнозированными скоростями потоков солнечного ветра с учетом как квазистационарных, так и транзиентных потоков, получено равным 82 км/с, а коэффициент корреляции – 0.6.

DOI: 10.31857/S0016794021020164

1. ВВЕДЕНИЕ

Одной из важных задач в области космической погоды является прогноз геомагнитных возмущений. Геомагнитная активность связана с солнечной активностью, одним из факторов которой являются потоки солнечного ветра (СВ), приходящие на околоземную орбиту. Заблаговременная информация о параметрах солнечного ветра является важным компонентом успешного прогнозирования геомагнитных возмущений. С развитием космических технологий в последнее время становятся востребованными модели прогнозирования, которые могут работать в режиме реального времени, используя оперативные данные наблюдений за Солнцем с космических и наземных обсерваторий. Так как потоки СВ распространяются от Солнца по гелиосфере со скоростями ~300–1200 км/с, то по наблюдениям Солнца можно прогнозировать приход потоков СВ на околоземную орбиту с заблаговременностью от десятков часов до 5–7 сут.

Потоки СВ можно разделить на транзиентные и квазистационарные. Транзиентные потоки или корональные выбросы масс (КВМ) являются наиболее геоэффективными. Исторически термин КВМ широко используется для описания выбросов солнечной плазмы, которые можно наблюдать на изображениях, получаемых с коронографов. Источниками КВМ могут быть вспышки или выбросы протуберанцев на Солнце, однако, в некоторых случаях корональные источники КВМ отследить не удается. Когда говорят о КВМ, параметры которых были зарегистрированы на КА в межпланетном пространстве, то обычно используют термин межпланетные КВМ или МКВМ. Квазистационарные потоки или фоновый солнечный ветер, по которому распространяются КВМ, можно условно разделить на два типа: высокоскоростные и медленные потоки. Высокоскоростные потоки (ВСП) СВ связаны с корональными дырами, областями униполярного магнитного поля с открытой конфигурацией маг-

нитных силовых трубок. Для определения положения и параметров корональных дыр могут использоваться магнитограммы или изображения Солнца, например, получаемые в ВУФ-диапазоне длин волн. Медленный СВ, со скоростями ниже 400 км/с, может быть связан с множеством разнообразных корональных источников: поясом стримеров, границами корональных дыр, районами около активных областей и т.д.

Наиболее известная модель прогноза параметров потоков СВ в режиме реального времени — *WSA + ENLIL + Cone* модель. Данная модель позволяет прогнозировать время прихода, кинетические и магнитные параметры МКВМ и квазистационарных потоков солнечного ветра с заблаговременностью несколько суток. Как видно из названия модели, она состоит из трех моделей. Модель *ENLIL* [Odstrčil and Pizzo, 1999; Odstrčil et al., 2004] представляет собой трехмерную гелиосферную модель распространения солнечного ветра в межпланетном пространстве, основанную на идеальных МГД-уравнениях. Внутренняя граница модели *ENLIL* располагается на 21.5 или 30 солнечных радиусах за пределами внешней критической точки, а внешняя граница может быть на расстояниях до 10 а. е. На вход модели *ENLIL* (внутренняя граница) поступают данные от модели *Wang-Sheeley-Arge (WSA)* [Arge and Pizzo, 2000; Arge et al., 2004]. Эта модель используется для моделирования фонового состояния плазмы солнечного ветра и магнитного поля в короне и внутренней гелиосфере. Модель Конуса (*Cone model*) [Zhao et al., 2002; Xie et al., 2004] — это эмпирическая модель, основанная на асимптотическом приближении распространения КВМ через межпланетное пространство в радиальном направлении с почти постоянной угловой шириной и с изотропным расширением. В модели Конуса используются угловая ширина, скорость и угловое положение КВМ, которые определяются по наблюдениям в коронографе. Модель Конуса обеспечивает входные параметры модели *ENLIL*, описывая введение облака плазмы с избыточным давлением в окружающий солнечный ветер, что соответствует прохождению КВМ по фоновому солнечному ветру. Однако это плазменное облако не описывается магнитными параметрами, которые бы моделировали структуру самого выброса (“*ejecta*” или магнитное облако). Следует отметить, что кроме модели конуса, описывающей геометрию распространения КВМ, существуют и другие модели, например, *Graduated Cylindrical Shell (GCS)* модель [Shi et al., 2015].

Еще одна модель, которая активно развивается в последнее время — модель солнечного ветра *EUHFORIA (European heliospheric forecasting information asset)*, состоящая из корональной и гелиосферной моделей квазистационарных потоков СВ, в которую включаются КВМ [Pomoell and

Poedts, 2018]. Для определения параметров плазмы солнечного ветра на внутренней границе до 0.1 а. е. применяется также полуэмпирическая корональная модель *WSA*, входными данными для которой являются карты коронального магнитного поля, а ее решения служат входными значениями для модели внутренней гелиосферы. Гелиосферная модель в свою очередь решает уравнения магнитной гидродинамики в трехмерном пространстве и во времени. В дополнение к моделированию фонового солнечного ветра, *EUHFORIA* может также моделировать КВМ либо с использованием модели Конуса, либо с использованием линейной модели сферомака [Shiota and Kataoka, 2016].

Кроме описанных выше, существуют другие подходы к прогнозированию параметров СВ. Например, модели, которые комбинируют наблюдения солнечной короны в ВУФ-диапазоне длин волн для прогноза фонового солнечного ветра и модель *Drag-Based (DBM)* [Vršnak et al., 2013] для прогноза скорости и времени прихода МКВМ. Сравнение *DBM*- и *ENLIL*-моделей для прогноза КВМ не показывает существенных отличий в точности прогноза для разных временных интервалов: 2010–2011 г. [Vršnak et al., 2014] или 2013–2018 гг. [Riley et al., 2018]. Результаты прогнозов фонового солнечного ветра с помощью модели *WSA* и моделей, основанных на данных о площадях корональных дыр, полученных из анализа ВУФ-изображений солнечной короны, также сравнимы по качеству [Reiss et al., 2016]. Надо отметить, что подход, который использует данные наблюдений солнечной короны в ВУФ-диапазоне длин волн и *DBM*-модель, отличается меньшими требованиями к данным и вычислительным ресурсам, чем *WSA-ENLIL + Cone* модель. В среднем при анализе многолетних временных периодов точность прогнозов фонового СВ, полученных разными моделями, составляет приблизительно ± 100 км/с по скорости СВ и около суток по времени прогноза, улучшаясь в период спада солнечного цикла и ухудшаясь в период максимума [Reiss et al., 2016; Bu et al., 2019]. Точность времени прихода МКВМ в среднем составляет ± 10 ч, но со стандартными отклонениями, часто превышающими 20 часов для периода 2014–2018 года [Riley et al., 2018]. Следует отметить, что точность прогноза МКВМ сильно зависит от того, какие спутниковые данные и критерии для отбора наблюдаемых КВМ были использованы. Однако, когда речь идет о прогнозе в режиме реального времени, то не все данные и подходы к прогнозированию можно использовать.

В статье описан подход к прогнозу скорости потоков СВ, основанный на эмпирических и численных моделях. Для прогноза скорости квазистационарных потоков СВ используется эмпирическая модель, связывающая параметры коро-

нальных дыр, полученные при анализе изображений Солнца в ВУФ-диапазоне длин волн, со скоростью солнечного ветра на околоземной орбите [Shugay et al., 2011]. Ранее эта модель применялась для решения задач прогнозирования высокоскоростных потоков (ВСП) СВ из областей корональных дыр [Shugay et al., 2017; Shugay et al., 2018]. Модель для прогнозирования квазистационарных потоков СВ реализована в режиме реального времени, и результаты ее работы выкладываются на сайте НИИЯФ МГУ (http://swx.sinp.msu.ru/models/solar_wind.php?gcm=1) [Kalegaev et al., 2019]. Спрогнозированные квазистационарные потоки СВ служат фоновой средой, по которой распространяются КВМ. Для прогноза скорости и времени прихода межпланетных корональных выбросов масс на околоземную орбиту применяется численная *Drag-Based (DBM)* модель [Vršnak et al., 2013], которая использовалась нами ранее для прогноза скорости и времени прихода МКВМ в геоэффективных событиях июня 2015 года [Shugay et al., 2017]. Для анализа результатов прогноза скорости потоков СВ нами был выбран период с мая по декабрь 2010 года, когда существовали обширные корональные дыры и после минимума солнечного цикла возросло количество КВМ.

2. ДАННЫЕ И МОДЕЛИ

2.1. Прогноз высокоскоростных потоков солнечного ветра

Для прогнозирования ВСП СВ использовалась эмпирическая модель, которая связывает площади корональных дыр (КД) и скорость СВ на 1 а. е. [Shugay et al., 2011, Shugay et al., 2018]. Площади КД определялись с помощью порогового алгоритма анализа изображений Солнца, полученных с космической обс. *SDO/AIA* на длинах волн 19.3 и 21.1 нм. Данные с обс. *SDO/AIA* начали поступать с мая 2010 года, поэтому прогнозы скорости ВСП СВ были рассчитаны начиная с мая 2010 года. Скорость и время прихода ВСП СВ моделировались по площадям КД, вычисленным по геоэффективной области, расположенной около центрального меридиана ($\pm 20^\circ$ по долготе и $\pm 40^\circ$ по широте) изображения Солнца, по формуле:

$$V(S_i, t) = V_{\min} + A_i S_i(t_{i0})^{\alpha_i}, \quad (1)$$

где $S_i(t_{i0})$ – относительная площадь КД, попадающая в выделяемую по широте и долготе полосу, в момент времени t_{i0} , на длине волны λ_i (19.3 или 21.1 нм); V_{\min} – минимальная скорость СВ, была взята равной 300 км/с (ей также заменяются периоды отсутствия прогноза ВСП СВ); A_i и α_i – подбираемые параметры, зависящие от длины волны λ_i , t – время прихода потока ВСП СВ на

околоземную орбиту. Коэффициенты A_i и α_i были подобраны путем минимизации ошибок прогнозирования: $A_i = 210$ и 190 и $\alpha_i = 0.4$ и 0.5 , соответственно для длин волн 19.3 и 21.1 нм. Время распространения СВ от солнечной короны по гелиосфере до 1 а. е. рассчитывается по баллистической модели, в которой движение СВ полагается равномерным и радиальным. Прогноз ВСП СВ рассчитывается в нескольких точках гелиосферы: на расстоянии в 20, 65, 115, 165 и 215 (1 а. е.) солнечных радиусов. Полученные данные о скорости спрогнозированных ВСП СВ также используются в качестве входного параметра для моделирования скорости и времени прихода МКВМ.

2.2. Отбор потенциально геоэффективных корональных выбросов массы из баз данных

В качестве основы для моделирования МКВМ использовались данные из каталога КВМ *CACTus*, который пополняется в режиме близком к реальному времени. *CACTus* – каталог параметров КВМ, автоматически детектируемых по изображениям, получаемым с коронографа *LASCO* на космическом аппарате *SOHO* (<http://sidc.oma.be/cactus/catalog.php>). Нами были рассмотрены события из каталога, произошедшие за период с 25.05.2010 по 31.12.2010 г. Всего за рассмотренный период автоматической системой *CACTus* было зарегистрировано 380 событий.

Автоматическая система *CACTus* определяет время начала КВМ, его длительность, центральный угол и угол раствора конуса, в котором наблюдается КВМ, а также скорость КВМ по анализу серии изображений, получаемой с коронографа *LASCO/SOHO*. Иногда, алгоритм разделяет один КВМ типа гало или полу-гало на несколько узконаправленных потоков. Поэтому для улучшения качества входных данных мы использовали алгоритм объединения событий. Если несколько событий удовлетворяли условиям временного и углового пересечения, то они объединялись в один выброс с угловым раствором (da), объединяющим угловые растворы каждого, и скоростью, соответствующей скорости того выброса, который превышал остальные по длительности более, чем в 1.5 раза. В случае, если выбросы по длительности были одинаковыми, рассчитывалась средняя скорость всех объединенных КВМ. Длительность такого составного КВМ устанавливалась от времени начала первого до времени конца последнего события. После объединения количество событий КВМ сократилось до 351.

Для выявления событий с залимбовыми источниками КВМ, использовалась база данных вспышек и диммингов *Solar Demon* (<http://solar-demon.oma.be/>). Корональные димминги обычно наблюдаются, как кратковременное уменьшение

интенсивности части изображения Солнца в мягком рентгеновском и ультрафиолетовом излучении, и могут быть связаны с флуктуациями плотности или температуры в солнечной короне. Колебания плотности могут быть вызваны выбросами солнечной плазмы. Если КВМ, связан с корональным источником на видимой стороне Солнца, то мы можем зарегистрировать от него димминг на фоне солнечного диска, если же на обратной стороне Солнца, то димминг или не будет наблюдаться, или будет наблюдаться над лимбом. Кроме того, с помощью диммингов удобно детектировать КВМ, которые могут быть связаны со вспышками или эрупцией протуберанцев на видимой стороне Солнца, но которые не всегда достаточно надежно регистрируются на коронографе из точки L1 [Kraaikamp and Verbeek, 2015]. Димминги, зафиксированные за указанный период, сопоставлялись с событиями КВМ, полученными из базы данных *CACTus*, по времени начала события. Так как события в базе данных *Solar Demon* доступны с конца мая 2010, рассматриваемый интервал времени начинается этим моментом и включает в себя остаток 2010 года, что соответствует росту активности 24-го солнечного цикла. За указанный период было зарегистрировано 90 диммингов (из них 38 не имеющих источника на видимой стороне солнца, то есть координаты димминга находились за пределами видимой стороны солнечного диска), из которых 44 можно сопоставить с КВМ. Наблюдение события димминга на солнечном диске, которое может быть связано с КВМ, происходит раньше, чем наблюдение самого КВМ в коронографе. КВМ считался соответствующим диммингу, если он наблюдался в коронографе *LASCO* после наблюдения димминга, но не позднее, чем через два часа. Таким образом 44 диммингам можно было поставить в соответствие 51 КВМ. Из этих диммингов 23 события были залимбовые, и соответствующие им 24 КВМ были нами отброшены из выборки, как не геоэффективные, т.е. с большой вероятностью не распространяющиеся в сторону Земли. Оставшимся 21 диммингу можно было поставить в соответствие 27 КВМ. Из остальных 46 диммингов, для которых не было найдено подходящего КВМ, 15 были залимбовые, а 31 оставались возможными источниками КВМ. Димминг может наблюдаться на изображениях Солнца, но КВМ может не быть зарегистрированным в коронографе. Это может происходить из-за перерывов и сбоя в работе инструмента *LASCO*, из-за того, что наблюдаемый димминг относился не к выбросу, а к не эруптивной корональной структуре, или был вызван флуктуациями параметров плазмы от мощных вспышек и выбросов, произошедших на обратной стороне Солнца.

В качестве дополнительной базы данных КВМ использовалась база данных *SEEDS LASCO* ([http://](http://spaceweather.gmu.edu/seeds/lasco.php)

spaceweather.gmu.edu/seeds/lasco.php). Она также пополняется в режиме близком к реальному времени и дает основную информацию о параметрах КВМ: дата и время начала события, центральный угол, угол раствора конуса, скорость и ускорение выброса. Алгоритм детектирования КВМ основан на автоматической обработке изображений коронографа *LASCO* также, как и у *CACTus*, но из-за отличий алгоритмов количество зафиксированных КВМ в этих базах может отличаться. По этой причине мы использовали базу *SEEDS*, чтобы найти КВМ, соответствующие диммингам, для которых не нашлось КВМ в базе *CACTus*. Из рассмотренных 31 димминга, которые не получилось сопоставить с событиями из базы данных *CACTus*, 6 относились к пропускам в данных, 6 событий соответствовали КВМ по базе данных *SEEDS LASCO* и 3 были найдены, как события в базе данных *CACTus FLOW* (список событий, параметры которых не удовлетворяют критериям базы для обозначения их полноценными КВМ, которые называются “подозрительные” регистрации КВМ). Таким образом в итоговый ряд КВМ вошло 115 событий.

Далее мы произвели отбор событий по углу раствора da и центральному углу pa : из полярных выбросов отбрасывались имеющие угловой раствор меньше 60, из экваториальных — меньше 30. После фильтрации осталось 94 события КВМ из баз данных, для которых осуществлялся прогноз скорости и времени прихода соответствующим им МКВМ на орбиту Земли.

2.3. Прогнозирование времени и скорости прихода корональных выбросов массы на орбиту Земли с помощью *DBM*-модели

Для моделирования КВМ обычно используют предположение о радиальном и само-подобном (с сохранением угловой ширины) распространении КВМ в гелиосфере. Модели (например, модель Конуса), основанные на этом предположении, в целом хорошо согласуются с измерениями *in situ*, хотя иногда наблюдаются значительные ошибки моделирования. В данном предварительном исследовании мы используем предположение о распространении выброса согласно *Drag-Based Model* [*DBM*: Vršnak et al., 2013]. В приближении *DBM* модели считается что, начиная с некоторого удаления от Солнца, динамика распространения КВМ определяется только взаимодействием КВМ с окружающим или фоновым солнечным ветром (F_d), то есть силой Лоренца (F_L) и гравитационным притяжением (F_g) можно пренебречь. Таким образом, начиная с некоторого расстояния от Солнца (более 15 солнечных радиусов по [Žic et al., 2015]), можно учитывать только силу вязкого трения F_d :

Таблица 1. Параметры некоторых транзитных событий, произошедших в июне 2010 года

Димминг		Параметры КВМ				Вход DBM-модели				Прогноз МКВМ		
t , дата и время	t , дата и время	dt , ч	v , км/с	pa	da	t , дата и время	v , км/с	w , км/с	g/k , км ⁻¹	t , дата и время	v , км/с	время распространения, дни
12.06 01:04	12.06 01:31	2	351	289	52	12.06 09:46	351	300	-0.5	16.06 00:53	538	3.97
12.06 09:28	12.06 9:54	5	295	68	82	12.06 19:44	295	470	0.5	16.06 06:44	559	3.87
—	15.06 00:14	4	432	62	34	15.06 06:56	432	560	0.5	18.06 15:33	475	3.64

Примечание: Для каждого события указано: время начала димминга (если есть), время наблюдения КВМ в коронографе *LASCO* и параметры КВМ по базе данных *SACTus* (длительность dt , средняя скорость v , центральный угол pa , угол раствора конуса da), параметры, подаваемые на вход *DBM*-модели (время нахождения КВМ на R_0 , скорость КВМ на R_0 , соответствующая этому времени скорость окружающего солнечного ветра w на расстоянии R_0 , рассчитанная по модели прогноза ВСП на основе площадей корональных дыр, соответствующий параметр ускорения g , деленный на безразмерный коэффициент $k = 10^{-7}$) и итоговый результат прогноза времени прихода МКВМ на орбиту Земли (время, скорость и время распространения, рассчитанное от наблюдения КВМ в коронографе). R_0 принято за 20 радиусов Солнца. Все углы указаны в градусах.

$$F = F_L - F_g + F_d \approx F_d, \text{ при } r > 15R_{\text{Sun}}. \quad (2)$$

Возникающее ускорение a_d может ускорять или замедлять КВМ, в зависимости от знака разности скоростей выброса v и окружающего солнечного ветра w :

$$a_d = -\gamma(v - w)|v - w|. \quad (3)$$

Параметр ускорения γ может считаться постоянным, или зависеть от параметров КВМ и вычисляться по формуле:

$$\gamma = \frac{c_d A \rho_{sw}}{M}, \quad (4)$$

где c_d – безразмерный коэффициент торможения, A и M – соответственно поперечное сечение и масса КВМ, а ρ_{sw} – функция плотности окружающего солнечного ветра.

Если окружающий солнечный ветер считается однородным и изотропным, то γ не зависит от расстояния, и эта задача решается аналитически и дает следующие функции скорости КВМ и пройденного расстояния от времени:

$$r(t) = \pm \frac{1}{\gamma} \ln(1 \pm \gamma(v_0 - w)t) + wt + r_0, \quad (5)$$

$$v(t) = w + \frac{v_0 - w}{1 \pm \gamma(v_0 - w)t}, \quad (6)$$

где \pm зависит от режима ускорения: “+” для замедления ($v_0 > w$), и “-” для ускорения ($v_0 < w$), а v_0 – скорость КВМ на расстоянии от Солнца, равном r_0 .

Выбор этой модели связан с тем, что она является достаточно простой численной моделью, но,

согласно исследованиям [Riley et al., 2018], результаты применения *DBM*-модели сравнимы с результатами более сложных МГД-моделей, такими как *WSA-ENLIL+Conc*.

Для использования *DBM*-модели необходимо, чтобы параметры КВМ были известны на расстоянии 15–20 солнечных радиусов, где все допущения модели вступают в силу. Для этого изначальный набор параметров КВМ был перенесен на 20 солнечных радиусов в приближении равномерного движения. Входными параметрами *DBM*-модели являются время начала наблюдения КВМ в коронографе, его скорость v , скорость окружающего солнечного ветра w и параметр ускорения γ . Параметр ускорения γ принимался равным $0.1 \times 10^{-7} \text{ км}^{-1}$, $0.2 \times 10^{-7} \text{ км}^{-1}$ и $0.5 \times 10^{-7} \text{ км}^{-1}$ для следующих значений скорости выброса $v > 1000 \text{ км/с}$, $500 < v \leq 1000 \text{ км/с}$ и $v \leq 500 \text{ км/с}$, соответственно [Vršnak et al., 2013]. Все параметры, необходимые для рассмотрения события, и прогнозируемые параметры представлены в табл. 1 на примере нескольких событий в июне 2010 года.

В качестве скорости окружающего солнечного ветра использовалась скорость, рассчитанная по описанной в разделе 2.1 модели прогноза ВСП СВ. Так как в процессе распространения КВМ в гелиосфере от 20 солнечных радиусов до 1 а. е. скорость фонового ветра, по которому распространяется КВМ, может меняться, то *DBM*-модель применялась поэтапно. Параметры *DBM*-модели обновлялись в нескольких точках гелиосферы от Солнца до Земли: на расстоянии в 20, 65, 115, 165 солнечных радиусов. В итоге, мы получили скорость МКВМ на 1 а. е. с учетом изменения

скорости фонового СВ в гелиосфере по мере распространения КВМ. Так как у каждого выброса по базам данных указана длительность, то прогноз МКВМ осуществлялся не для одной точки, а для набора точек, соответствующих часам длительности КВМ. На данном этапе работы взаимодействия между распространяющимися одновременно в гелиосфере несколькими КВМ не учитывалось. Здесь также стоит упомянуть, что обычно наблюдаемая структура МКВМ сложная. Достаточно часто перед МКВМ наблюдается ударная волна и область сжатия (sheath) между ударной волной и ежета (или магнитным облаком) [Ермолаев и Ермолаев, 2009]. Все эти структуры отличаются параметрами плазмы: плотностью, температурой, величиной и направлением магнитного поля. Модель DBM не позволяет прогнозировать приход ударной волны, связанной с КВМ, таким образом в работе мы не рассматриваем отдельно разные структуры МКВМ на околоземной орбите, а только прогнозируем время прихода и скорость МКВМ.

2.4. Добавление прогнозов корональных выбросов массы к прогнозу фонового солнечного ветра

В нашей модели КВМ описываются события, скорость которых в коронографе измеряется обычно в течение 2–6 ч (реже от 7 до 13 ч). В работе [Temmer et al., 2017] было получено, что фоновому солнечному ветру требуется 2–5 дней для того, чтобы восстановиться от воздействия прошедшего по нему МКВМ, что достаточно много по сравнению со средней продолжительностью самого МКВМ (1.3 дня). Мы смоделировали, что воздействие МКВМ на фоновый СВ длится еще некоторое время после прогнозируемого момента прихода МКВМ на околоземную орбиту. Если одновременно на околоземную орбиту пришло несколько МКВМ с разными скоростями, то их скорости усреднялись (рис. 1, верхний график). Участок с 12 часами до и после спрогнозированного времени прихода МКВМ считался временем, когда на околоземной орбите наблюдались МКВМ с прогнозируемой скоростью, а временной интервал с 12 до 48 часов после считался областью с остаточными следами воздействия МКВМ на фоновый СВ. В данном упрощенном подходе влияние МКВМ на фоновый СВ рассчитывалось как усреднение между спрогнозированными скоростями МКВМ и фонового СВ. На рисунке 1 (нижний график) представлен прогноз скорости СВ, когда к прогнозу скорости ВСП СВ, рассчитанному по площадям корональных дыр, был добавлен прогноз скорости МКВМ, полученный с помощью DBM-модели.

2.5. Формирование окончательного прогноза скорости солнечного ветра

Прогнозировать скорость медленных потоков СВ по изображениям Солнца в разных спектральных диапазонах длин волн сложно из-за большого числа и разнообразия корональных источников медленных потоков СВ. Однако, из-за небольшого разброса скоростей медленных потоков СВ от 260 до 400 км/с, ошибки в прогнозировании, даже если скорость медленного СВ аппроксимировать просто средним значением, сравнимы и меньше, чем ошибки прогнозирования ВСП СВ или МКВМ. В начальной версии прогноза скорость медленных потоков СВ была принята равной 300 км/с. Однако, для уменьшения ошибок прогнозирования медленных потоков СВ мы использовали эмпирическое соотношение (7) на основе измеренных на КА ACE скорости СВ на предыдущем обороте Солнца и минимальной скорости СВ за последние пол-оборота Солнца, что позволило улучшить общее качество прогноза.

$$V(t) = \frac{V_{obs}(t - 672 \text{ ч}) + \min[V_{obs}(t_0 - 1 \text{ ч}), (V(t_0 - 2 \text{ ч}), \dots, (V_{obs}(t_0 - 336 \text{ ч}))]}{2} \quad (7)$$

где $V(t)$ значение прогноза скорости медленного СВ на момент времени t , V_{obs} — измеренная в точке L1 на КА ACE скорость СВ в различные моменты времени в прошлом, начиная от момента времени t_0 , в который делается прогноз в режиме реального времени. Для формирования окончательного прогноза скорости СВ на околоземной орбите на тех временных отрезках, где отсутствует прогноз скорости ВСП СВ и МКВМ, был добавлен прогноз скорости медленных потоков СВ, рассчитанных по формуле 7 (рис. 2).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Как было отмечено выше, всего за период май–декабрь 2010 года было отобрано 94 КВМ из баз данных, из них 69% КВМ со скоростью до 400 км/с и 31% более 400 км/с. Средняя скорость всех отобранных КВМ была равна 331 ± 188 км/с. Таким образом, большинство отобранных нами КВМ — это достаточно медленные потоки СВ, которые ускоряются в гелиосфере за счет взаимодействия с более быстрым фоновым СВ, большую часть которого составляли ВСП СВ (рис. 3, верхний график). Нами было получено, что ускоряется 65% КВМ, а замедляется 35%, что согласуется с распределением КВМ по скоростям больше или меньше 400 км/с. Как видно на нижнем графике на рис. 3, на околоземной орбите в большинстве случаев в период времени, в которой прогнозировался приход МКВМ, наблюдались медленные потоки СВ со средней скоростью 377 ± 80 км/с.

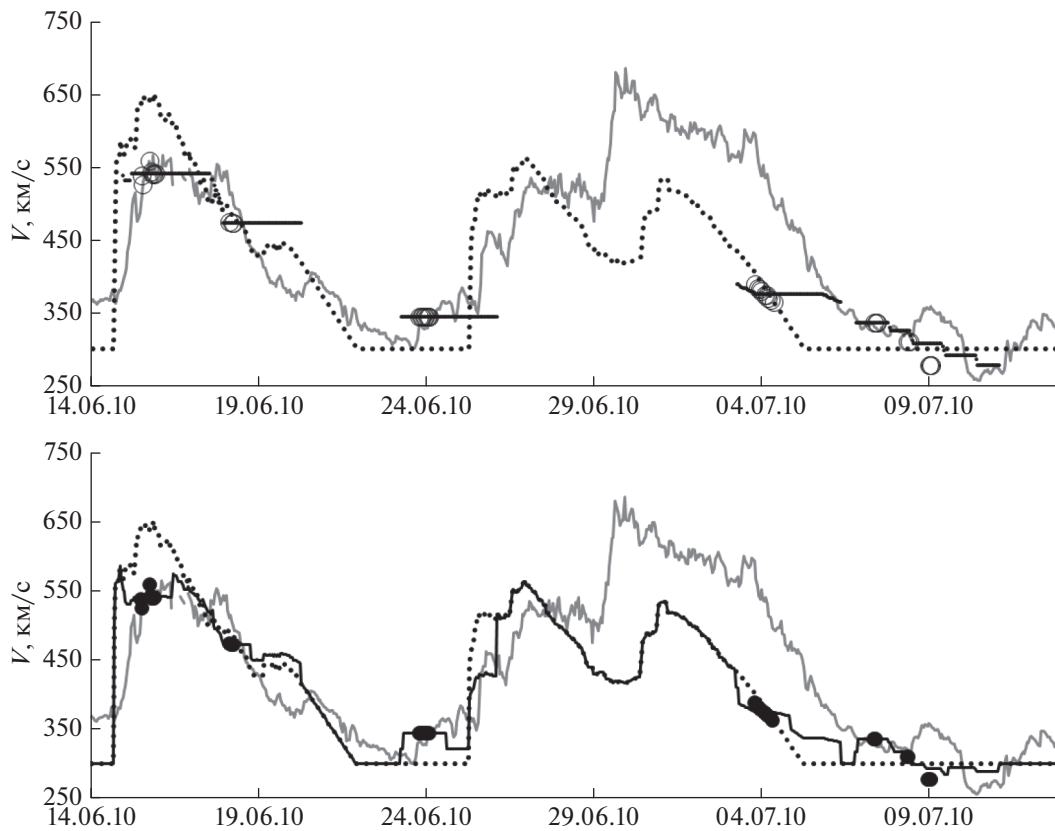


Рис. 1. На верхнем графике: серая кривая — скорость СВ по данным с КА ACE, черная пунктирная кривая — прогноз скорости квазистационарных высокоскоростных потоков СВ, полученный на основе анализа площадей корональных дыр. Черными кружками отмечены времена прихода и скорости МКВМ. Черные отрезки на верхнем графике показывают время, в течение которого учитывается влияния МКВМ на фоновый СВ. На нижнем графике: черная кривая — совместный прогноз скорости ВСП СВ из корональных дыр и МКВМ.

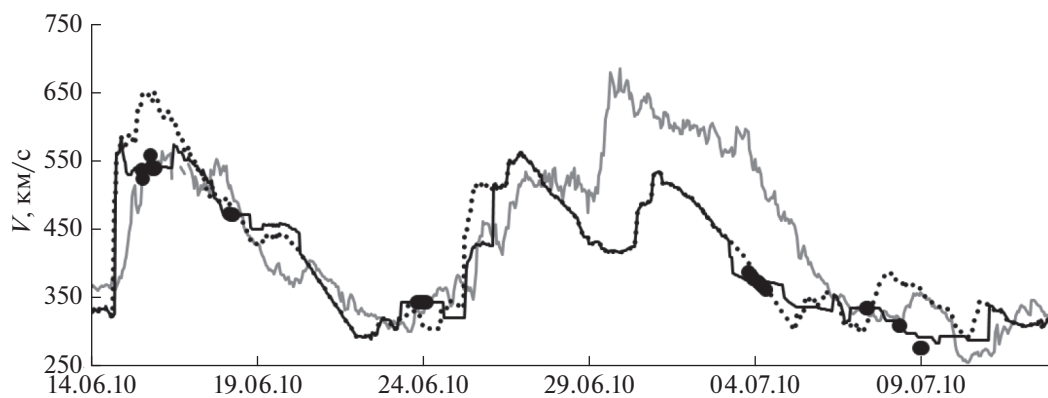


Рис. 2. Серая кривая — наблюдаемая скорость СВ по данным КА ACE, черная пунктирная кривая — смоделированная скорость квазистационарных потоков СВ (ВСП и медленных потоков СВ), черная кривая — смоделированная скорость, которая кроме квазистационарных потоков учитывает прогноз МКВМ. Черными кружками отмечены времена прихода и скорости МКВМ.

Таким образом, 67% из отобранных нами из баз данных КВМ вносят вклад в медленную компоненту СВ со скоростью меньше 400 км/с.

В основном спрогнозированные *DBM*-моделью МКВМ связаны со спокойной геомагнитной обстановкой $Dst > -30$ нТл и только 2 МКВМ связа-

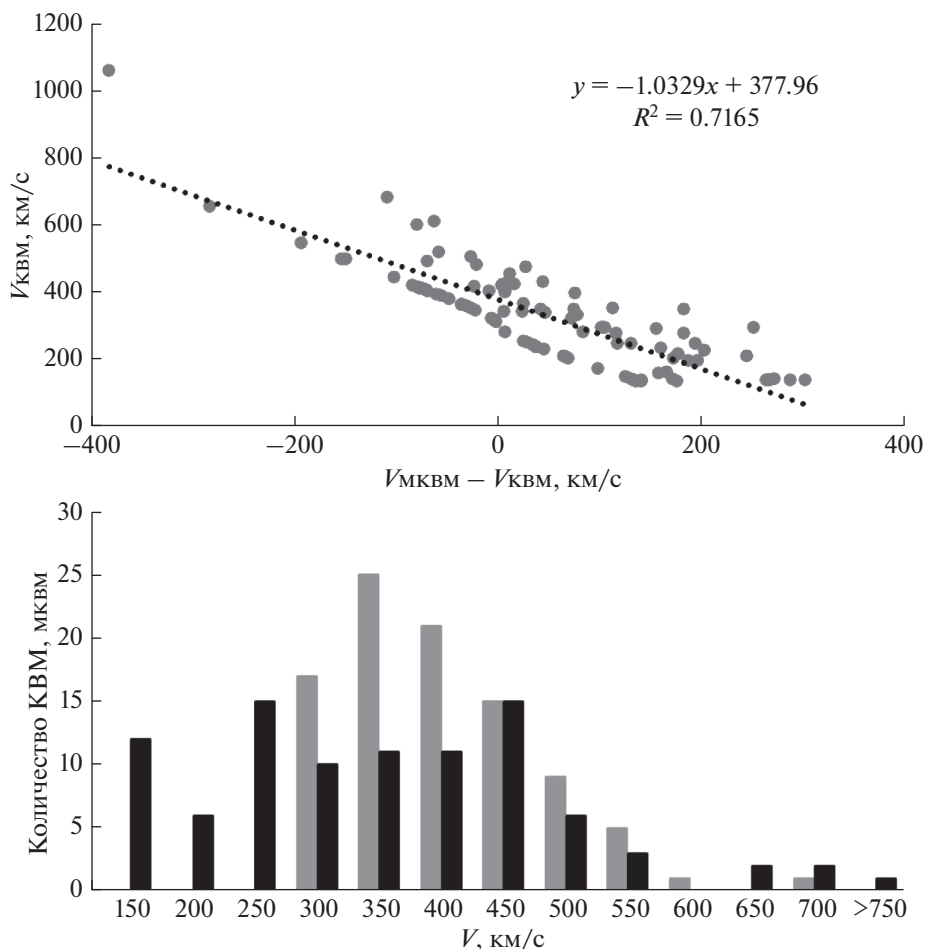


Рис. 3. На верхнем графике – представлено соотношение между измеренной на коронографе *LASCO/SOHO* скоростью КВМ и разностью скоростей транзитных потоков, спрогнозированных ($V_{\text{МКВМ}}$) и наблюдаемых в коронографе ($V_{\text{КВМ}}$), что определяет ускорение (отрицательные величины) или замедление (положительные величины) КВМ в гелиосфере. Черная пунктирная кривая – линейная аппроксимация отношения. В правом верхнем углу графика отображены формула линейной аппроксимации и коэффициент множественной детерминации, характеризующий достоверность аппроксимации. На нижнем графике – гистограмма распределений скоростей наблюдаемых в коронографе КВМ ($V_{\text{КВМ}}$, черные столбцы) и спрогнозированных МКВМ ($V_{\text{МКВМ}}$, серые столбцы).

ны со слабыми геомагнитными бурями $Dst > -50$ нТл, а 2 с умеренными $-50 \text{ нТл} > Dst > -100$ нТл. В каталоге МКВМ [Richardson and Cane, 1995] в анализируемый период времени всего 5 событий МКВМ (<http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.html>). Три события МКВМ спрогнозированы нами в пределах суток, одно с задержкой по времени около 2 суток, а одно, 03.08.2010 г. с $Dst = -74$ нТл, не было спрогнозировано из-за отсутствия данных с коронографа *LASCO/SOHO*.

Нами было также проведено сравнение количества смоделированных МКВМ с каталогом ИКИ РАН [Ермолаев и др., 2009] (<ftp://ftp.iki.rssi.ru/pub/omni/catalog/>). Используемая нами модель *DBM* не позволяет прогнозировать ударные волны и области сжатия, связанные МКВМ, поэтому мы не анализировали их наличие в спро-

гнозированных нами событиях. Всего в каталоге ИКИ, за рассматриваемый период времени, отмечено 22 интересующих нас события: 20 событий типа *ejecta* и 2 события типа магнитное облако. Мы установили соответствие (в пределах 24 часов) между спрогнозированными нами 27 событиями МКВМ и 12 событиями типа *ejecta* и 1 событием типа магнитное облако из каталога ИКИ. Следует отметить, что иногда одному событию из каталога ИКИ соответствовали несколько спрогнозированных нами. Таким образом, удалось спрогнозировать больше половины событий из каталога ИКИ РАН. Можно предположить, что источники остальных событий, которые мы не смогли спрогнозировать, не были зарегистрированы в коронографе или ошибки прогноза составили более 24 часов. Остальные события, спрогнозированные нами и отсутствующие

Таблица 2. Параметры качества прогноза скорости солнечного ветра для различных комбинаций используемых моделей

	ВСП	ВСП + МСВ	ВСП + КВМ	(ВСП + КВМ) + МСВ	(ВСП + МСВ) + КВМ
СКО	91	85	86	83	82
>400 км/с	108	98	109	107	104
<400 км/с	75	72	60	59	58
КК	0.55	0.55	0.6	0.59	0.6
>400 км/с	0.51	0.5	0.51	0.52	0.52
<400 км/с	0.23	0.26	0.29	0.28	0.29

Примечание: Среднеквадратичное отклонение (СКО) и коэффициент корреляции (КК) между измеренными значениями скорости СВ с КА ACE и спрогнозированными значениями скорости: ВСП – только ВСП по площадям корональных дыр, ВСП + МСВ – прогноз ВСП с добавлением прогноза МСВ по измерениям с предыдущего оборота Солнца, ВСП + МКВМ – прогноз ВСП и МКВМ с помощью модели DBM и данных о параметрах КВМ с коронографа, (ВСП + КВМ) + МСВ – прогноз получается путем добавления прогноза МСВ к прогнозу ВСП и МКВМ, (ВСП + МСВ) + КВМ – прогноз получается путем добавления прогноза МКВМ к прогнозу ВСП и МСВ.

щие в каталоге ИКИ РАН, или по магнитно-гидродинамическим параметрам неотличимы от фонового солнечного ветра и не могут быть классифицированы как ejecta, или представляют собой ложные прогнозы МКВМ.

В нашей работе мы учитывали небольшие по угловому распределению КВМ разных скоростей, а не только КВМ типа гало и полу-гало. Кроме того, мы не отбирали КВМ по скорости. В момент прогноза прихода МКВМ на околоземную орбиту значения модуля межпланетного магнитного поля, измеренные на КА ACE, в среднем равны ~5 нТл. События с такими низкими значениями модуля магнитного поля обычно не учитываются в каталогах МКВМ. В статье [Kilrua et al., 2012] отмечается, что за период 2007–2010 годов в дополнение к 84 хорошо идентифицируемым МКВМ было найдено еще 58 МКВМ-подобных событий, которые демонстрируют некоторые классические свойства МКВМ, но имеют слабые значения магнитного поля (<7 нТл) и/или короткие периоды длительности (<10 ч). Однако, в статье указывается, что количество найденных МКВМ-подобных событий меньше, чем количество узких КВМ, зарегистрированных по наблюдениям в коронографе. Часть небольших КВМ с пониженной плотностью и скоростью, из-за процессов взаимодействия с окружающим солнечным ветром в гелиосфере, может приходить на околоземную орбиту с параметрами уже не отличимыми от фонового СВ, в котором они распространяются. Предполагается, что такие небольшие КВМ могут составлять значительную часть компоненты медленного солнечного ветра. Так как мы отбирали КВМ с угловым раствором от 60 градусов для полярных и от 30 градусов для экваториальных широт, и с любыми скоростями, то большая часть этих КВМ могла внести вклад в медленную компоненту фонового СВ, став не отличимой по магнитогидродинамическим параметрам от нее.

За период с мая по декабрь 2010 года были рассчитаны среднеквадратичное отклонение (СКО) и коэффициент корреляции (КК) между значениями скорости СВ, спрогнозированными по описанным выше методикам и измеренными на КА ACE. Результаты для потоков СВ всех скоростей, измеренных на КА ACE, и отдельно для медленных (<400 км/с) и быстрых (>400 км/с) потоков представлены в таблице 2. СКО между наблюдаемыми и спрогнозированными скоростями квазистационарных потоков СВ, включающими в себя ВСП и медленный СВ, равно 86 км/с (ВСП_МСВ, табл. 2). Для сравнения можно добавить, что СКО между наблюдаемыми и спрогнозированными с помощью модели WSA значениями скорости квазистационарных потоков СВ на трое суток вперед было равно 90 км/с для фазы роста 23-го солнечного цикла в 1998–1999 годах [Owens et al., 2005]. Из таблицы 2 видно, что добавление к прогнозу ВСП прогноза медленного СВ уменьшает СКО.

Добавление прогноза МКВМ к прогнозу квазистационарных потоков СВ увеличивает КК для потоков СВ всех скоростей и уменьшает СКО для медленного СВ. Этот результат согласуется с тем, что в 2010 году прогноз МКВМ вносит значительный вклад именно в прогноз медленной компоненты СВ, со скоростями меньше, чем 400 км/с. Добавление прогноза МКВМ к квазистационарным потокам СВ позволило уменьшить СКО между измеренными и спрогнозированными потоками СВ с 85 до 82 км/с и увеличить КК с 0.55 до 0.6 за период май–декабрь 2010 года.

Для улучшения качества прогноза МКВМ, требуется учесть знание множества факторов, способных оказать влияние на эволюцию распространяющихся в гелиосфере КВМ. В этой работе при прогнозе МКВМ учитывались только скорость и угловая ширина КВМ. Мы также использовали информацию о расположении возможно-

го источника КВМ, но учитывали только возможность регистрации залимбового события. Учет взаимодействия квазистационарных потоков СВ и КВМ происходит в рамках *DBM*-модели. Однако, в данной модели не учитываются изменения параметров КВМ из-за КВМ-КВМ взаимодействия в гелиосфере. В работе [Rodkin et al., 2018] показано, что половина всех КВМ за период 2010–2011 года – это взаимодействующие КВМ. Половина из всех (47 из 94) рассматриваемых нами КВМ могла провзаимодействовать в гелиосфере перед приходом на околоземную орбиту. Взаимодействуя, потоки СВ, в зависимости от своих параметров, могут сформировать объединенные области взаимодействия (*merged interaction region*) [Burlaga, 2003]. Области объединенного взаимодействия могут быть очень сложными и сильно отличаться по кинетическим и магнитным параметрам от параметров КВМ до момента взаимодействия.

Не только скорость распространения КВМ в гелиосфере, но и направление его распространения и конфигурация могут изменяться из-за взаимодействия прогнозируемого КВМ с другими потоками СВ в межпланетном пространстве или в солнечной короне [Nieves-Chinchilla et al., 2013]. Наблюдения показывают, что КВМ отклоняются по направлению к экватору около солнечного минимума [Gopalswamy, 2003] из-за доминирования крупномасштабного дипольного магнитного поля и высокоскоростных потоков солнечного ветра из обширных полярных корональных дыр. При распространении КВМ в межпланетном пространстве отклонения по долготе к востоку могут происходить, когда КВМ блокируется медленным солнечным ветром впереди КВМ. В противном случае, когда высокоскоростной поток солнечного ветра догоняет медленный КВМ, КВМ может ускориться и отклониться к западу. Однако, отклонению подвергается только сам выброс, но не ударная волна, связанная с ним [Prise et al., 2015]. Если КВМ взаимодействовал с коротирующей областью впереди высокоскоростного потока солнечного ветра, то его форма может стать не симметричной, а его кинетические и магнитные параметры могут сильно измениться.

Точность прогноза скорости КВМ зависит от точности прогноза фонового СВ, по которому он распространяется. В настоящее время физические магнитогидродинамические и эмпирические модели фонового ветра дают схожий результат прогноза на больших временных интервалах (СКО приблизительно ± 100 км/с по скорости и около суток по времени прихода ВСП СВ) из-за невозможности получить данные прямых измерений параметров СВ в короне и в достаточном количестве точек гелиосферы. Анализ качества прогноза фонового СВ с ходом солнечного

цикла и изменение параметров модели, основанное на этом анализе, могут также улучшить качество прогноза фонового СВ.

4. ВЫВОДЫ

В работе представлены численные и эмпирические модели прогноза скорости потоков СВ и результаты их работы, включающие в себя прогноз скорости квазистационарных (фоновых) потоков СВ и добавленный к ним прогноз скорости МКВМ. В рамках модельных допущений для прогнозирования МКВМ, ВСП и медленного СВ, представленный прогноз дает результаты, сравнимые с другими моделями, способными работать в режиме реального времени. На примере 2010 года было получено, что добавление прогноза МКВМ в прогноз фонового СВ позволяет улучшить прогноз скорости СВ на околоземной орбите. Среднеквадратичное отклонение между измеренными и спрогнозированными потоками СВ уменьшилось с 85 до 82 км/с, а коэффициент корреляции увеличился с 0.55 до 0.6. Большинство отобранных нами из базы данных КВМ, распространяющихся по спрогнозированному фоновому ветру, дают вклад в медленные и не геоэффективные потоки солнечного ветра. За период с мая по декабрь 2010 года, на фазе роста солнечного цикла, 67% из всех МКВМ пришли на околоземную орбиту со скоростями менее 400 км/с, а 90 из 94 МКВМ связаны со спокойной геомагнитной обстановкой ($Dst > -30$ нТл). Однако, можно предположить, что на других фазах солнечного цикла эта ситуация может кардинально измениться.

5. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность научным коллективам проектов *SDO/AIA* и *ACE*, а также составителям баз данных *CACTus*, *SEEDS*, *Solar Demon* за предоставление доступа к данным.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование проведено в НИИЯФ МГУ за счет гранта Российского научного фонда (РНФ) № 16-17-00098.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ермолаев Ю.И., Ермолаев М.Ю. Солнечные и межпланетные источники геомагнитных бурь: аспекты космической погоды // Геофизические процессы и биосфера. Т. 8. № 1. С. 5–35. 2009.
- Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г., Ермолаев М.Ю. Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976–2000 г. // Космич. иссл. Т. 47. № 2. С. 99–113. 2009.

- *Arge C.N., Luhmann J.G., Odstrčil D., Schrijver C.J., Li Y.* Stream structure and coronal sources of the solar wind during the May 12th, 1997 CME // *J. Atmos. Sol-Terr. Phys.* V. 66. P. 1295–1309. 2004.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2004.03.018>
- *Arge C.N., Pizzo V.J.* Improvement in the prediction of solar wind conditions using near-real time solar magnetic field updates // *J. Geophys. Res.* V. 105. P. 10 465–10 480. 2000.
<https://doi.org/10.1029/1999JA000262>
- *Bu X., Luo B., Shen C., Liu S., Gong J., Cao Y., Wang H.* Forecasting high-speed solar wind streams based on solar extreme ultraviolet images // *Space Weather.* V. 17. P. 1040–1058. 2019.
<https://doi.org/10.1029/2019SW002186>
- *Burlaga L., Berdichevsky D., Gopalswamy N., Lepping R., Zurbuchen T.* Merged interaction regions at 1 AU // *J. Geophys. Res: Space Physics.* V. 108(A12). P. 1–12. 2003.
<https://doi.org/10.1029/2003JA010088>
- *Gopalswamy N., Shimojo M., Lu W., Yashiro S., Shibasaki K., Howard R.A.* Prominence eruptions and coronal mass ejection: A statistical study using microwave observations // *Astrophys. J. V.* 586. № 1. P. 562–578. 2003.
<https://doi.org/10.1086/367614>
- *Kalegaev V., Panasyuk M., Myagkova I. et al.* Monitoring, analysis and post-casting of the Earth’s particle radiation environment during February 14–March 5, 2014 // *J. Space Weather and Space Clim.* V. 9. A 29. 2019.
<https://doi.org/10.1051/swsc/2019029>
- *Kilpua E.K.J., Jian L.K., Li Y., Luhmann J.G., Russell C.T.* Observations of ICMEs and ICME-like Solar Wind Structures from 2007–2010 Using Near-Earth and STEREO Observations // *Sol. Phys.* V. 281. P. 391–409. 2012.
<https://doi.org/10.1007/s11207-012-9957-0>
- *Kraaikamp E., Verbeek C.* Solar Demon – an approach to detecting flares, dimmings, and EUV waves on SDO/AIA images // *J. Space Weather Space Clim.* V. 5. A18. P. 1–16. 2015.
<https://doi.org/10.1051/swsc/2015019>
- *Nieves-Chinchilla T., Vourlidis A., Stenborg G., Savani N.P., Koval A., Szabo A., Jian L. K.* Inner Inner Heliospheric Evolution of a “Stealth” CME Derived from Multi-View Imaging and Multipoint In-situ observations: I. Propagation to 1 AU // *The Astrophys. J. V.* 779. № 1. P. 55–68. 2013.
<https://doi.org/10.1088/0004-637X/779/1/55>
- *Odstrčil D., Pizzo V.J.* Three-dimensional propagation of CMEs in a structured solar wind flow: 1. CME launched within the streamer belt // *J. Geophys. Res.* V. 104. P. 483–492. 1999.
<https://doi.org/10.1029/1998JA900019>
- *Odstrčil D., Riley P., Zhao X.P.* Numerical simulation of the 12 May 1997 interplanetary CME event // *J. Geophys. Res. (Space Phys.) V.* 109 (A02116). P. 1–8. 2004.
<https://doi.org/10.1029/2003JA010135>
- *Owens M.J., Arge C.N., Spence H.E., Pembroke A.* An event-based approach to validating solar wind speed predictions: High-speed enhancements in the Wang-Sheeley-Arge model // *J. Geophys. Res.* V. 110. P. 25 613–25 620. 2005.
<https://doi.org/10.1029/2005JA011343>
- *Pomoell J., Poedts S.* EUHFORIA: European heliospheric forecasting information asset // *J. Space Weather Space Clim.* V. 8(A35). P. 1–14. 2018.
<https://doi.org/10.1051/swsc/2018020>
- *Prise A.J., Harra L.K., Matthews S.A., Arridge C.S., Achilleos N.* Analysis of a coronal mass ejection and corotating interaction region as they travel from the Sun passing Venus, Earth, Mars, and Saturn // *J. Geophys. Res: Space Physics.* V. 120. P. 1566–1588. 2015.
<https://doi.org/10.1002/2014JA020256>
- *Reiss M.A., Temmer M., Veronig A.M., Nikolic L., Vennertstrom S., Schöngassner F., Hofmeister S.J.* Verification of high-speed solar wind stream forecasts using operational solar wind models // *Space Weather.* V. 14. P. 495–510. 2016.
<https://doi.org/10.1002/2016SW001390>
- *Richardson I.G., Cane H.V.* Regions of abnormally low proton temperature in the solar wind (1965–1991) and their association with ejecta // *J. Geophys. Res: Space Physics.* V. 100. P. 23397–23412. 1995.
<https://doi.org/10.1029/95JA02684>
- *Riley P., Mays 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>
- *Rodkin D., Slemzin V., Zhukov A.N., Goryaev F., Shugay Yu., Veselovsky I.* Single ICMEs and Complex Transient Structures in the Solar Wind in 2010–2011 // *Solar Phys.* V. 293(A78). P. 1–27. 2018.
<https://doi.org/10.1007/s11207-018-1295-4>
- *Shi T., Wang Y., Wan L., Cheng X., Ding M., Zhang J.* Predicting the Arrival Time of Coronal Mass Ejections With the Graduated cylindrical shell and drag force model. *Astrophys. J.*, 806(2), 271, 2015.
<https://doi.org/10.1088/0004-637X/806/2/271>
- *Shiota D., Kataoka R.* Magnetohydrodynamic simulation of interplanetary propagation of multiple coronal mass ejections with internal magnetic flux rope (SUSANOO-CME) // *Space Weather.* V. 14. P. 56–75. 2016.
<https://doi.org/10.1002/2015SW001308>
- *Shugay Yu S., Veselovsky I.S., Seaton D.B., Berghmans D.* Hierarchical Approach to Forecasting Recurrent Solar Wind Streams // *Solar System Res.* V 45. № 6. P. 546–556. 2011.
<https://doi.org/10.1134/S0038094611060086>
- *Shugay Y.S., Slemzin V.A., Rod’kin D.G.* Features of solar wind streams on June 21–28, 2015 as a result of interactions between coronal mass ejections and recurrent streams from coronal holes // *Cosmic Res.* V. 55. P. 389–395. 2017.
<https://doi.org/10.1134/S0010952517060107>
- *Shugay Yu., Slemzin V., Rodkin D., Yermolaev Yu., Veselovsky I.* Influence of coronal mass ejections on parameters of high-speed solar wind: a case study // *J. Space Weather and Space Clim.* V. 8(A28). P. 1–13. 2018.
<https://doi.org/10.1051/swsc/2018015>
- *Temmer M., Reiss M.A., Nikolic L., Hofmeister S.J., Veronig A.M.* Preconditioning of Interplanetary Space Due to Transient CME Disturbances // *The Astrophys. J. V.* 835. № 2. P. 141–147. 2017.
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/835/2/141>

- *Vršnak B., Žic T., Vrbanec D., Temmer M., et al.* Propagation of interplanetary coronal mass ejections: The drag-based model // *Solar Phys.* V. 285. P. 295–315. 2013. <https://doi.org/10.1007/s11207-012-0035-4>
- *Vršnak B., Temmer M., Žic T., Taktakishvili A., Dumbović M., Möstl C., Veronig A.M., Mays M.L., Odstrčil D.* Heliospheric propagation of coronal mass ejections: Comparison of numerical WSA-ENLIL + Cone model and analytical drag-based model // *Astrophys J. Supplement Series.* V. 213. № 2. P. 21–30. 2014. <https://doi.org/10.1088/0067-0049/213/2/21>
- *Xie H., Ofman L., Lawrence G.* Cone model for halo CMEs: application to space weather forecasting // *J. Geophys. Res. (Space Phys.)* V. 109(A03109). P. 1–13. 2004. <https://doi.org/10.1029/2003JA010226>
- *Zhao X.P., Plunkett S.P., Liu W.* Determination of geometrical and kinematical properties of halo coronal mass ejections using the cone model // *J. Geophys. Res. (Space Phys.)* V. 107. P. 1223–1232. 2002. <https://doi.org/10.1029/2001JA009143>
- *Žic T., Vršnak B., Temmer M.* Heliospheric Propagation of Coronal Mass Ejections: Drag-Based Model Fitting // *Astrophys. J. Supplement Series.* V. 218. № 2. P. 32–39. 2015. <https://doi.org/10.1088/0067-0049/218/2/32>