

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ГЕОЭФФЕКТИВНЫХ ПОТОКОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА ВБЛИЗИ ЗЕМЛИ ПО ДАННЫМ СОЛНЕЧНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Ю. С. Шугай¹, В. А. Слемзин², Д. Г. Родькин², И. С. Веселовский^{1,3}

Разработана полуэмпирическая модель прогнозирования потоков солнечного ветра (СВ) на основе спутниковых изображений Солнца и короны с использованием иерархического подхода, позволяющая одновременно рассчитывать параметры всех трех компонент СВ – медленного СВ, высокоскоростных потоков из корональных дыр и межпланетных корональных выбросов масс и выявлять их возможное взаимодействие в гелиосфере.

Ключевые слова: Солнце, солнечный ветер, корональные выбросы массы, рекуррентные высокоскоростные потоки, моделирование солнечного ветра, ионный состав солнечного ветра.

Межпланетные корональные выбросы массы (МКВМ), наряду с высокоскоростными рекуррентными потоками солнечного ветра (ВСП СВ) из корональных дыр (КД), являются наиболее геоэффективными (вызывающими магнитные бури) потоками солнечного ветра (СВ). Для прогнозирования геомагнитных возмущений наиболее важно знать момент прихода геоэффективных потоков к Земле. В случае ВСП СВ, для прогнозирования используются полуэмпирические модели, основанные на идентификации открытых областей магнитного поля, используя магнитограммы и модель потенциального поля на поверхности источника: модель Ванга, Шили и Арджа WSA [1, 2], модель Еселевича, Файнштейна и Руденко [3]. Эти методы имеют ограниченную точность из-за статичности магнитных карт и неточности потенциального приближения для экстраполяции магнитного поля в корону, и не могут применяться для прогнозирования транзиентных потоков СВ. В отличие от этих моделей, в модели Шугай и др. [4] прогноз ВСП выполняется по спутниковым наблюдениям солнечного диска в диапазоне

¹ НИИЯФ МГУ, 119991 Россия, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, 1с2.

² ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: slem@sci.lebedev.ru.

³ ИКИ РАН, 117342 Россия, Москва, Профсоюзная ул., 84/32.

длин волн вакуумного ультрафиолета (ВУФ) с учетом конфигурации магнитного поля. Расчет проводится с использованием иерархического подхода [4], который также позволяет включать в прогноз параметры других компонент СВ – медленного фонового СВ и МКВМ.

МКВМ ассоциируются с корональными выбросами массы (КВМ), происходящими в результате спонтанной солнечной активности или эрупции волокон. Время прихода к Земле и параметры плазмы МКВМ зависят от положения и параметров источника эрупции (активная область или эруптивировавшее волокно), разгонной траектории КВМ и условий движения в гелиосфере. Идентификация источника КВМ очень важна для прогнозирования возможной геоэффективности МКВМ (направленность КВМ на Землю, параметры магнитного поля МКВМ).

Анализ параметров МКВМ по данным каталога Ричардсона и Кейн (РК, [5]) за период январь 2010 г. – август 2011 г., показал, что в 30% случаев МКВМ могут иметь несколько источников КВМ, потоки от которых могут взаимодействовать в гелиосфере. В зависимости от соотношения пространственно-временных параметров КВМ, взаимодействие может приводить к запаздыванию или опережению их прихода к Земле по сравнению с прогнозом для одиночного потока и существенным образом повлиять на их геоэффективность. В результате взаимодействия образуются комплексные структуры, включающие МКВМ, ВСП и переходные области, в которых такие параметры потоков СВ, как скорость, плотность и температура протонов, а также напряженность и распределение по компонентам магнитного поля отличаются от параметров одиночных событий. В то же время, зарядовый состав плазмы МКВМ и ВСП, определяемый по отношениям плотностей ионов C^{6+}/C^{5+} , O^{7+}/O^{6+} , Fe/O и среднему заряду ионов железа $\langle Q_{Fe} \rangle$, “замораживается” в короне и сохраняет свойства родительских потоков при взаимодействии. По структуре ионного состава комплексных транзиентов можно восстановить источники потоков и типы их взаимодействия (объединение или взаимодействие последовательных КВМ, взаимодействие КВМ–ВСП).

Проведенные ранее исследования [6–8] показали, что существует заметная положительная корреляция ионного состояния плазмы МКВМ с типом источника КВМ (наличием вспышки, ее длительности, пиковой температуры вспышечной плазмы, уровня солнечной активности). В работе [9] было проведено моделирование начальной стадии формирования КВМ в короне на высотах до 4–5 солнечных радиусов и показано, что полученный модельный ионный состав плазмы КВМ хорошо согласуется с ионным составом МКВМ, наблюдаемым около Земли. В работе [10] показано, что в случаях, когда

источник КВМ (активная область) располагается близко к источнику ВСП (корональная дыра), взаимодействие КВМ и ВСП в короне приводит к подавлению горячей компоненты плазмы МКВМ.

Таким образом, для улучшения точности прогнозирования СВ представляется оптимальным рассчитывать приход потоков разного типа (МКВМ, ВСП, медленный СВ) одновременно в рамках одной модели и учитывать их возможное взаимодействие в гелиосфере. В качестве исходных данных лучше всего использовать регулярно получаемые изображения Солнца в ВУФ области спектра, магнитограммы и коронографические изображения КВМ, по которым можно определить тип источника потока СВ, начальные кинематические характеристики потока и его ионный состав.

В настоящей работе описывается полуэмпирическая модель прогнозирования потоков СВ, созданная на базе ранее разработанной модели для расчета ВСП [4]. Применяемый в этой модели иерархический подход дает возможность с помощью анализа солнечных изображений одновременно определять приходящие к Земле компоненты СВ: медленный СВ, ВСП СВ и МКВМ, и выявлять их возможное взаимодействие в гелиосфере.

Для определения возможного вклада квазистационарных потоков СВ (медленный СВ и ВСП) используется прогноз скорости потоков СВ, связанных с корональными дырами, на основе анализа изображений с ВУФ-телескопа AIA в каналах 171, 193 и 211 Å и магнитограмм, получаемых прибором HMI с космической обсерватории SDO [11, 12]. Методы обработки изображений и прогнозирования скорости квазистационарных потоков СВ описаны в работах [4, 13, 14].

Источниками квазистационарных потоков СВ являются корональные дыры (КД), которые на изображениях, полученных в ВУФ диапазоне, видны как области пониженной интенсивности. На изображениях, полученных с телескопа SDO/AIA, выделяются КД в области около центрального меридиана: $\pm 30^\circ$ по долготе и $\pm 50^\circ$ по широте, создающие потоки, направленные в сторону Земли. Скорость СВ, приходящего к Земле, рассчитывается по формуле:

$$V(S_i, t) = V_{\min} + A_i \cdot S_i(t_{i0}),$$

где $S_i(t_{i0})$ – относительная площадь КД, попадающая в выделяемую полосу по широте и долготе, в момент t_{i0} , на длине волны λ_i ; V_{\min} – минимальная (фоновая) скорость СВ; A_i – параметр, зависящий от длины волны λ_i , t – время прихода потока СВ на околоземную орбиту по прогнозу скорости. В данной версии модели время прихода СВ

от поверхности источника к Земле рассчитывается в баллистическом приближении [15, 16], в котором движение СВ в гелиосфере полагается равномерным и радиальным. По данным работы [16], в этом приближении средняя точность расчета времени прихода квазистационарных потоков к Земле составляет 1 сутки.

При прогнозировании МКВМ, для идентификации источников – КВМ, направленных в сторону Земли, используются изображения, полученные с космических аппаратов (КА): STEREO-A/STEREO-B [17], SDO/AIA [11], SOHO/LASCO [18]. В рассматриваемый нами период 2011 г. КА SDO и SOHO находились на околоземной орбите и в точке либрации L1, соответственно, а КА STEREO-A и STEREO-B на орбите Земли вблизи плоскости, перпендикулярной линии Солнце–Земля и проходящей через Солнце (углы менее 11°). Данные о параметрах КВМ получаются с сайта SEEDS (Solar Eruptive Detection System [19]). В тестовых событиях 2011 г. КВМ, направленные в сторону Земли, определялись по одновременному (в интервале 1 часа) появлению КВМ в коронографах COR-2 STEREO-A на восточном лимбе и COR-2 STEREO-B на западном лимбе. При этом учитывались КВМ с шириной, перекрывающей экваториальную плоскость. В настоящее время для этой цели используются корональные изображения SOHO/LASCO (гало и частичные гало). Положение источников на диске уточняется по ВУФ-изображениям с SDO/AIA.

Время прихода к Земле и скорость МКВМ также рассчитывается по баллистической модели, исходя из экстраполяции скорости КВМ в короне по данным коронографов. Профили скорости СВ вблизи Земли рассчитываются с шагом 1 час, причем скорость МКВМ суммируется со скоростью квазистационарного потока (медленный СВ и ВСП) по формуле [2]:

$$V_{\text{СВ}} = \sqrt{\frac{2}{\frac{1}{V_{\text{ВСП}}^2} + \frac{1}{V_{\text{МКВМ}}^2}}}.$$

Разработанная модель была протестирована на событиях 2011 г. По данным каталога РК [5], всего за период 2011 г. в СВ около Земли было идентифицировано 30 МКВМ. Сравнение рассчитанных по этой модели времен прихода МКВМ к Земле с наблюдениями (рис. 1) показало, что отклонения расчетных значений от измеренных составило от –37 часов (опережение расчетного времени) до 22 часов (запаздывание), средняя (по модулю) погрешность расчета составила 16 часов, при этом в 90% случаев отклонение укладывалось в погрешность баллистического приближения (24 часа). Анализ ионного состава показал, что большинство событий значительных отклонений расчетного времени прихода МКВМ от измеренного соответствовали случаям с несколькими источ-

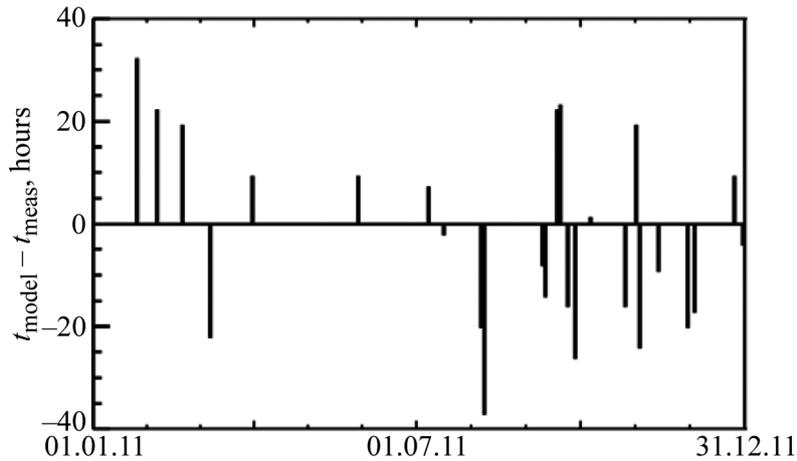


Рис. 1: Отклонение рассчитанных по настоящей модели времен прихода МКВМ t_{model} от измеренных t_{meas} (каталог РК) по данным 2011 г.

никами, в которых происходило взаимодействие потоков типа КВМ-КВМ, КВМ-ВСП, однако окончательный результат зависит от соотношения скоростей и времен вылета потоков.

В качестве примера, на рис. 2 показаны профили параметров СВ и модельный расчет профиля скорости СВ, включающего МКВМ и ВСП, для периода 13–19 июля 2011 г., в котором наблюдался КВМ на фоне хвостовой части потока СВ из КД, характеризующейся падением скорости СВ, и через сутки – приход ВСП из другой КД. 18 июля в 04:30 UT по данным с КА ACE [20] скорость СВ увеличилась с фонового значения (~ 350 км/с) до 450 км/с, что было обусловлено приходом ВСП от КД. Как указано в каталоге РК, 15 июля 2011 г. в 04:00 UT в СВ был зарегистрирован МКВМ со скоростью 463 км/с. По данным STEREO-A/STEREO-B, приведенным в каталоге SEEDS, источником этого МКВМ послужил КВМ, стартовавший с поверхности Солнца 11 июля в 11:24 UT со скоростью 446/499 км/с. Модель спрогнозировала приход МКВМ 15 июля в 02:00 UT со скоростью 420 км/с и приход ВСП 18 июля в 05:00 UT со скоростью 460 км/с. Профили параметров ионного состава СВ (отношения ионов O^{7+}/O^{6+} и среднего заряда ионов железа $\langle Q_{Fe} \rangle$) соответствовали типичным зависимостям для невзаимодействующих МКВМ и ВСП [21, 22]. Рассчитанные по модели параметры потоков хорошо согласовывались с измеренными: времена прихода МКВМ различались на 2 часа, величины скорости – на 40 км/с; для ВСП различие по времени прихода составило 1 час, по скорости – 10 км/с.

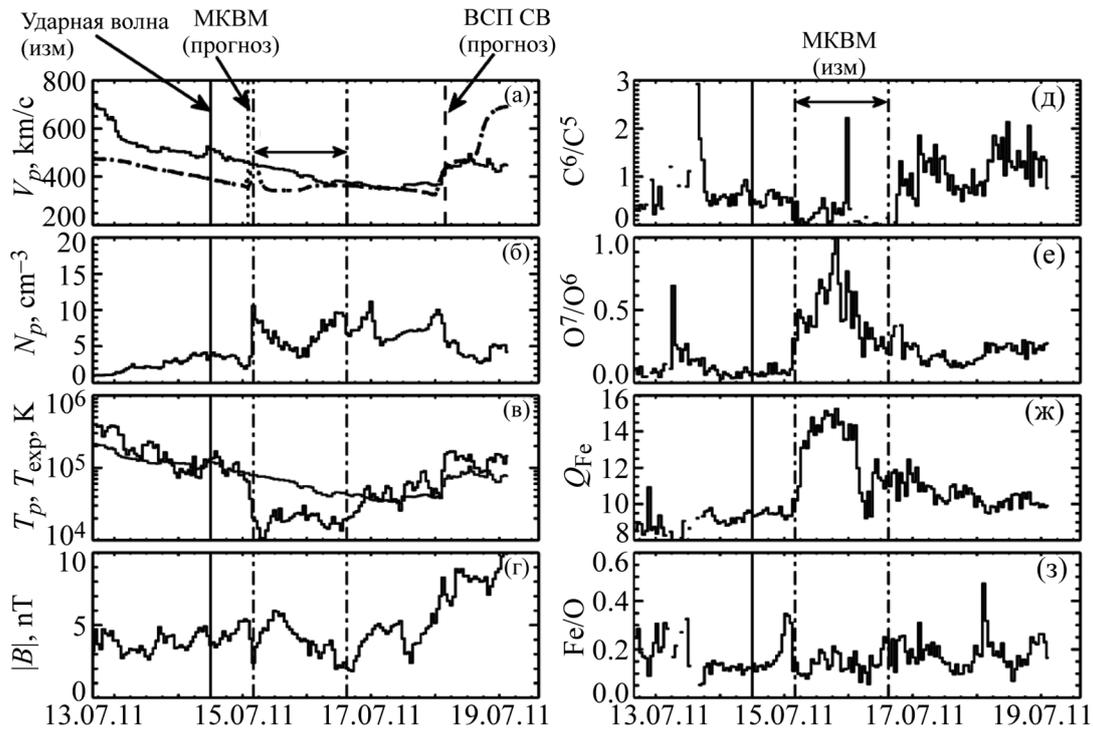


Рис. 2: Параметры СВ по измерениям ACE [20] 13–19 июля 2011 года. Слева: (а) измеренная скорость протонов (сплошная линия) и рассчитанная по настоящей модели скорость СВ с учетом МКВМ (штрихпунктирная линия). Вертикальными линиями обозначены моменты: прихода ударной волны (сплошная линия), прогноз прихода МКВМ (точечная линия), границы МКВМ по каталогу РК, прогноз прихода ВСП СВ (штриховая линия); (б) плотность протонов; (в) измеренная температура протонов (толстая линия) и ожидаемая по скорости протонов температура (тонкая линия); (г) модуль магнитного поля. Справа: (д) и (е) отношение плотностей ионов C^{6+}/C^{5+} и O^{7+}/O^{6+} ; (ж) средний заряд ионов железа $\langle Q_{Fe} \rangle$; (з) отношение плотностей ионов Fe/O .

В дальнейшем предполагается вместо баллистического приближения использовать для прогнозирования МКВМ более точную модель магнитно-динамического взаимодействия КВМ с фоновым СВ (Drag-based model [23, 24]), обеспечивающую расчет времени прихода МКВМ с точностью 7–12 часов, а также в случае множественных источников ввести поправки на взаимодействие потоков.

Авторы выражают глубокую благодарность научным коллективам проектов SDO(AIA), STEREO, SOHO(LASCO) и ACE за предоставление доступа к данным. Ра-

бота выполнена в соответствии с Соглашением между ФИАН и НИИЯФ МГУ о сотрудничестве в области научно-исследовательской деятельности при поддержке грантов Российского научного фонда: № 16-17-00098 (Ю. С. Шугай, разработка алгоритма прогнозирования и проведение тестовых расчетов); № 17-12-01567 (В. А. Слемзин, Д. Г. Родькин – идентификация источников и исследование ионного состава МКВМ, сравнение расчетов с измерениями параметров СВ).

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Y. M. Wang, N. R. Jr. Sheeley, *The Astrophysical Journal* **355**, 726 (1990).
- [2] C. N. Arge and V. J. Pizzo, *Journal of Geophysical Research* **105**(A5), 10465 (2000).
- [3] В. Г. Еселевич, В. Г. Файнштейн, Г. В. Руденко и др. *Космические исследования* **47**(2), 114 (2009).
- [4] Ю. С. Шугай, И. С. Веселовский, Д. Б. Ситон, Д. Бергманс, *Астрономический вестник* **45**(6), 560 (2011).
- [5] Near-Earth Interplanetary Coronal Mass Ejections Since January 1996, compiled by Ian Richardson and Hilary Cane – URL: <http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.htm>.
- [6] J. R. Gruesbeck, S. T. Lepri, T. H. Zurbuchen, and S. K. Antiochos, *The Astrophysical Journal* **730**, 103 (2011).
- [7] S. T. Lepri, J. M. Laming, C. E. Rakowski, and R. von Steiger, *The Astrophysical Journal* **760**, 105 (2012).
- [8] Д. Г. Родькин, Ю. С. Шугай, В. А. Слемзин, И. С. Веселовский, *Астрономический вестник* **50**(1), 48 (2016).
- [9] D. Rodkin, F. Goryaev, P. Pagano, et al., *Solar Phys.* **292**, 90 (2017).
- [10] Д. Г. Родькин, Ю. С. Шугай, В. А. Слемзин, И. С. Веселовский, *Краткие сообщения по физике ФИАН* **43**(9), 44 (2016).
- [11] J. R. Lemen, A. M. Title, D. J. Akin, et al., *Solar Phys.* **275**, 17 (2012).
- [12] J. Shou, P. H. Scherrer, R. I. Bush, et al., *Solar Phys.* **275**, 229 (2012).
- [13] Y. Shugay, V. Slemzin, and I. Veselovsky, *J. Space Weather Space Clim.* **4**, A24 (2014).
- [14] В. А. Слемзин и Ю. С. Шугай, *Космические исследования* **53**(1), 51 (2015).
- [15] J. T. Nolte and E. C. Roelof, *Sol. Phys.* **33**, 241 (1973).
- [16] P. MacNeice, B. Elliott, and A. Acebal, *Space Weather* **9**, S10003 (2011).

- [17] R. A. Howard, J. D. Moses, A. Vourlidas, et al., *Space Science Rev.* **136**, 67 (2008).
- [18] G. E. Brueckner, R. A. Howard, M. J. Koomen, et al., *Solar Phys.* **162**, 357 (1995).
- [19] Solar Eruptive Event Detection System (SEEDS) – URL: <http://spaceweather.gmu.edu/seeds/>.
- [20] The ACE Science Center (ASC). ACE Level 2 (Verified) Data – URL: <http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/level2/index.html>.
- [21] I. G. Richardson, H. V. Cane, *J. Geophys. Res.* **109**, A09104 (2004).
- [22] J. E. Borovsky and M. H. Denton, *J. Geophys. Res. Space Physics* **121**(7), 6107 (2016).
- [23] B. Vršnak and T. Žic, *Astronomy & Astrophysics* **472**, 937 (2007).
- [24] B. Vršnak, T. Žic, D. Vrbanec, et al., *Solar Phys.* **285**, 295 (2013).

Поступила в редакцию 3 октября 2017 г.