**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ
КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАССЫ И ПРОГНОЗ
ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ ПО ДАННЫМ
НАЗЕМНЫХ ПАТРУЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ**

Арабаджян Д.К.¹, Пашенко М.П.¹, Тлатов А.Г.^{1,2}

¹*Кисловодская Горная астрономическая станция ГАО РАН, Россия
tlatov@mail.ru*

²*КалмГУ, Элиста, Россия*

**MODELING OF CORONAL MASS EJECTIONS AND PROGNOSIS
GEOMAGNETIC ACTIVITY ACCORDING GROUND-BASE PATROL
OBSERVATION**

Arabadzian D.K.¹, Pashenko M.P.¹, Tlatov A.G.^{1,2}

¹*Kislovodsk Mountain Astronomical Station, Russia*

²*Kalmyk state university, Elista, Russia*

We present models of the propagation of coronal mass ejections (CME) based on the interaction of CME with the solar wind through aerodynamic drag. The parameters of the solar wind are calculated according to the observation data of the STOP magnetograph. The parameters of the CME at the initial stage of propagation are determined from the data of the patrol telescopes.

DOI: 10.31725/0552-5829-2018-35-38

Введение

В настоящее время для количественного прогнозирования космической погоды используются комплексные математические модели. Для определения параметров солнечного ветра и эволюции корональных выбросов массы (КВМ) наиболее широкое распространение получила корональная модель Wang-Sheeley-Arge (WSA) [1, 2] в сочетании с глобальной гелиосферной моделью солнечного ветра ENLIL [3]. Модель WSA обеспечивает расчет магнитного поля и скорости солнечного ветра на границе между корональными и гелиосферными моделями, обычно при 21,5R. Для модели необходимы синоптические карты фотосферного магнитного поля. Неточности, вызванные ошибками наблюдения солнечного магнитного поля, особенно в полярных областях, могут приводить к большим продольным сдвигам в структуре и скорости солнечного ветра [3].

3-мерная МГД модель MHD WSA-ENLIL обеспечивает вычисление во времени параметров фонового солнечного ветра и магнитного поля, в которое может быть внедрено распространение КВМ. В этой модели не проводятся расчеты КВМ на начальной стадии, а используются данные о кинематических свойствах КВМ, полученные из данных наблюдений коро-

нографов LASCO. Оценка кинематических и геометрических параметров 3D KBM делается на предположениях, что геометрические свойства KBM аппроксимируются моделью Конуса [4], которая предполагает изотропное расширение, радиальное распространение и постоянство угловой ширины конуса KBM. Как правило, возмущение KBM вводятся в модель WSA-ENLIL в виде срезов однородного сферического облака плазмы с равномерной скоростью, плотностью и температурой в качестве граничного условия на расстояниях $21,5R$ солнечных радиусов. На основе данных наблюдений коронографов определяют скорость, местоположение и ширину облака. Плотность облака KBM является свободным параметром, которую часто задают в четыре раза больше, чем средние значения в окружающем быстром ветре, обеспечивая давление в четыре раза выше, чем в окружающем быстром ветре. Температура облака принимается равной температуре окружающего ветра.

Другим подходом для определения параметров KBM основано на предположении, что в динамике KBM доминирует «аэродинамическое» сопротивление МГД [5]. В этом предположении KBM которые движутся быстрее, чем окружающий солнечный ветер, замедляются, тогда как те KBM, которые медленнее, чем солнечный ветер, ускоряется окружающим потоком [6].

В данной работе мы предлагаем модели и схему прогноза, основанную на наблюдениях телескопа-магнитографа СТОП для определения параметров спокойного солнечного ветра на основе эмпирической модели WSA, определения параметров KBM на начальном этапе распространения по данным патрульных телескопов и расчет распространения KBM на основе аэродинамического взаимодействия KBM с солнечным ветром.

Модель

Модель расчета параметров квазистационарных потоков солнечного ветра на основе наблюдений магнитографа СТОП, установленного в Кисловодске, была представлена в [7, 8]. В данной работе выполнено сопряжение модели расчета спокойного солнечного ветра с моделью распространения KBM. Для этого мы вводим начальные условия KBM в виде облака точек, имеющих свои скорости. Далее мы выполняем расчет траекторий точек с учетом аэродинамического взаимодействия с потоком солнечного ветра. В данной модели мы рассматриваем квадратичную зависимость ускорения a от относительной скорости KBM [6]:

$$a = -\gamma(v - w)|v - w|, \quad (1)$$

где v – мгновенная скорость KBM, w – скорость окружающего солнечного ветра. Каждое значения (a, v и w) является функцией от времени t . Параметр сопротивления γ может быть выражен как:

$$\gamma = \frac{c_d A \rho_w}{M + M_v}, \quad (2)$$

где C_d – безразмерный коэффициент сопротивления, A – поперечное сечение КВМ, ρ_w – плотность окружающего солнечного ветра, M – масса ICME. Так называемая виртуальная масса, M_v , приблизительно может быть выражена как $M_v \sim \rho_w V/2$, где V – объем ICME. Таким образом, учитывая, что $M = \rho V$, где ρ – плотность КВМ, параметр γ также может быть выражен как:

$$\gamma = \frac{c_d A \rho_w}{V(\rho + \frac{\rho_w}{2})} = \frac{c_d}{L(\frac{\rho}{\rho_w} + \frac{1}{2})}, \quad (3)$$

где L – толщина КВМ в радиальном направлении, и можно аппроксимировать, что $V \sim AL$. Параметр γ изменяется с расстоянием, так что он тоже неявно зависит от времени. Таким образом, уравнение движения:

$$\frac{d^2 r}{dt^2} = -\gamma(r) \left(\frac{dr}{dt} - w(r) \right) \left| \frac{dr}{dt} - w(r) \right|, \quad (4)$$

где r – гелиоцентрическое расстояние ведущего края КВМ. Полученные уравнения использовались для определения траектории КВМ, распространяющегося от Солнца в гелиосфере.

Рис. 1. Схема распространения солнечного ветра и КВМ.

На рис. 1 представлена схема распространения солнечного ветра и КВМ для конфигурации магнитных полей 2015.11.06. Представлен разрез в плоскости эклиптики и в перпендикулярной плоскости. Внизу вид на КВМ с Земли. Средняя скорость солнечного ветра была около ~ 600 км/с, коэффициент аэродинамического сопротивления $\gamma = 10^{-7} \text{ с}^{-1}$. На рис. 2а представлены изменения во времени максимальной скорости КВМ в зависимости от начальной скорости КВМ. При начальной средней скорости

КВМ $v_0 = 500$ км/с на начальном этапе движения происходит ускорение вещества КВМ потоком более быстрого солнечного ветра. При скорости $v_0 = 700$ км/с происходит замедление скорости ветра. Но спустя 2 дня скорости КВМ сходятся к одним величинам. На рис. 2b представлены зависимости максимальной скорости КМ для значений $\gamma = 5 \cdot 10^{-6}$; 10^{-7} ; $2 \cdot 10^{-7}$. Для больших значений γ поведение скорости может быть немонотонным во времени. Это происходит вследствие попадания КВМ в потоки солнечного ветра различной скорости.

Рис. 2. Изменения скорости КВМ в потоке солнечного ветра в зависимости от начальной скорости (слева) и коэффициента γ (справа).

Выводы

В данной работе представлена схема расчета параметров КВМ, основанная на данных наблюдений телескопа СТОП и патрульных телескопах и комплексной математической модели взаимодействия солнечного ветра с КВМ. Показано, что солнечный ветер эффективно воздействует на распространение КВМ, и его учет является обязательным при оценке геоэффективности КВМ.

Работа выполнена при частичной поддержке проекта РФФИ №15-02-03900 и проекта РНФ №15-12-20001.

Литература

1. Arge, C.N., Pizzo, V.J. // J. Geophys. Res., 2000, **105**, 10465.
2. Arge, C.N., Luhmann, J.G., Odstrčil, D., Schrijver, C.J., Li, Y. // J. Atmos. Solar-Terr. Phys., 2004, **66**, 1295.
3. Jian, L.K., Russell, C.T., Luhmann, J.G., et al. // Solar Phys., 2011, **273**, 179.
4. Zhao, X.P., Plunkett, S.P., Liu, W. // J. Geophys. Res., 2002, **107**, 1223.
5. Cargill, P.J., Chen, J., Spicer, D.S., Zalesak, S.T. // J. Geophys. Res., 1996, **101**, 4855.
6. Vršnak, B., Vrbanec, D., Čalogović, J. // Astron. Astrophys., 2008, **490**, 811.
7. Tlatov, A.G.; Pashchenko, M.P.; Ponyavin, D.I.; et al. // Geomagnetism and Aeronomy, 2016, V. 56, p. 1095.
8. Tlatov, A.G.; Shramko, A.D.; Chernov, Ya.O.; et al. // Geomagnetism and Aeronomy, 2017, V. 57, p. 854-858.