

РАННЯЯ ДИАГНОСТИКА ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ НА ОСНОВЕ НАБЛЮДЕНИЙ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

EARLY DIAGNOSTICS OF GEOMAGNETIC STORMS BASED ON OBSERVATIONS OF SPACE MONITORING SYSTEMS

В.Г. Гетманов

Геофизический центр РАН,
Москва, Россия, vgetm2015@yandex.ru
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
Москва, Россия, vgetm2015@yandex.ru

А.Д. Гвишиани

Геофизический центр РАН,
Москва, Россия, a.gvishiani@gcras.ru
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
Москва, Россия, a.gvishiani@gcras.ru

Д.В. Перегудов

Геофизический центр РАН,
Москва, Россия, d.peregoudov@gcras.ru

И.И. Яшин

Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ», Москва, Россия IYashin@mephi.ru

А.А. Соловьев

Геофизический центр РАН,
Москва, Россия, a.soloviev@gcras.ru
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
Москва, Россия, a.soloviev@gcras.ru

М.Н. Добровольский

Геофизический центр РАН,
Москва, Россия, m.dobrovolsky@gcras.ru

Р.В. Сидоров

Геофизический центр РАН,
Москва, Россия, r.sidorov@gcras.ru

V.G. Getmanov

Geophysical Center of RAS,
Moscow, Russia, vgetm2015@yandex.ru
Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS,
Moscow, Russia, vgetm2015@yandex.ru

A.D. Gvishiani

Geophysical Center of RAS,
Moscow, Russia, a.gvishiani@gcras.ru
Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS,
Moscow, Russia, a.gvishiani@gcras.ru

D.V. Peregoudov

Geophysical Center of RAS,
Moscow, Russia, d.peregoudov@gcras.ru

I.I. Yashin

National Research Nuclear University MEPHI,
Moscow, Russia, IYashin@mephi.ru

A.A. Soloviev

Geophysical Center of RAS,
Moscow, Russia, a.soloviev@gcras.ru
Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS,
Moscow, Russia, a.soloviev@gcras.ru

M.N. Dobrovolsky

Geophysical Center of RAS,
Moscow, Russia, m.dobrovolsky@gcras.ru

R.V. Sidorov

Geophysical Center of RAS,
Moscow, Russia, r.sidorov@gcras.ru

Аннотация. Рассмотрена задача ранней диагностики геомагнитных бурь на основе применения моделей координат движений центров солнечных корональных выбросов массы (КВМ) и наблюдений их угловых положений, получаемых от измерительных систем космического мониторинга. Предложен метод ранней диагностики геомагнитных бурь, введена функция прогноза расстояния между Землей и центрами КВМ, сформирована процедура принятия решений. Разработан алгоритм диагностики, основанный на минимизации функционала обобщенной триангуляции. Реализованы пример вычисления функции прогноза расстояния и процедуры принятия диагностического решения на основе моделей координат и модельных наблюдений угловых положений центров солнечных КВМ. Определена эффективность процедуры принятия решений для алгоритма ранней диагностики геомагнитных бурь.

Ключевые слова: корональные выбросы масс, геомагнитные бури, космический мониторинг, диагностические решения, функционал триангуляции.

Abstract. We address the problem of early diagnostics of geomagnetic storms based on the use of models of coordinates of movements of centers of solar coronal mass ejections (CME) and observations of their angular positions obtained from space monitoring systems. We propose a method for early diagnostics of geomagnetic storms, introduce a function to predict the distance between Earth and CME centers, and establish a decision-making procedure. We give an example of calculating the distance prediction function and implement the diagnostic decision-making procedure based on coordinate models and model observations of angular positions of CME centers. We determine the efficiency of the decision-making procedure for the algorithm for early diagnostics of geomagnetic storms.

Keywords: coronal mass ejections, geomagnetic storms, space monitoring, diagnostic solutions, triangulation functional.

ВВЕДЕНИЕ

Солнечные корональные выбросы массы (КВМ) оказывают существенное воздействие на магнитосферу Земли, вызывают магнитные бури и приводят к возможным большим проблемам при функционировании технических и биологических объектов. Ранняя диагностика геомагнитных бурь является актуальной научной задачей [Handbook of Cosmic ..., 2015; Solar Eruptions and ..., 2006]. По данной проблематике имеются две категории публикаций по моделям, связанным с диагностикой и предсказанием времени прибытия КВМ. К первой категории относятся публикации с описаниями моделей, в которых реализуются подходы, основанные на уравнениях магнитной гидродинамики плазменных образований, ко второй — публикации, в которых рассматриваются различные варианты нелинейных моделей движения КВМ.

В статье [Odstroil, 2003] описывается модель ENLIL, используемая NASA для прогнозов в гелиосфере, которые осуществляются путем решения уравнений магнитной гидродинамики. Основной особенностью данной модели является отсутствие в ней механизма разогрева солнечной короны, который описывается феноменологически. Точность прогнозов прибытия КВМ к Земле по этой модели составляет около восьми часов. В статье [Jin et al., 2017] описывается модель BATSRUS, также основанная на уравнениях магнитной гидродинамики, но включающая механизм разогрева солнечной короны за счет альфвеновской турбулентности. Благодаря этому модель последовательно описывает не только гелиосферу, но и солнечную корону. Описан также инструмент EEGGL, позволяющий по оптическим и магнитным наблюдениям задавать начальные условия для КВМ, дальнейшее движение которого через корону и гелиосферу может быть рассчитано согласно уравнениям модели. На сайте [<http://helio-weather.net/archive/2008/05>] представлена модель WSA-ENLIL, являющаяся усовершенствованной версией [Odstroil, 2003]. Подходы, использующие решения уравнений магнитной гидродинамики и основанные на детальном рассмотрении физики процессов в гелиосфере, потенциально могут обеспечить эффективное решение задачи ранней диагностики.

В статье [Owens, Cargill, 2004] рассмотрены три феноменологические модели распространения КВМ, позволяющие вычислять время прибытия. В первой модели считается, что выброс движется с постоянным ускорением на всем пути от Солнца до орбиты Земли. Во второй предполагается, что до некоторого расстояния, меньшего радиуса земной орбиты, выброс движется равноускоренно, а далее равномерно. В третьей модели считается, что ускорение выброса пропорционально разности скоростей выброса и окружающего солнечного ветра, коэффициент пропорциональности зависит от расстояния до Солнца по степенному закону. Первая модель содержит два параметра (начальную скорость и ускорение), вторая — три параметра (начальную скорость, ускорение и расстояние, на котором ускоре-

ние прекращается). Третья модель содержит четыре параметра (начальную скорость, степень и множитель в коэффициенте увлечения и асимптотическую скорость солнечного ветра). В [Gopalswamy et al., 2000] на основе 28 межпланетных событий КВМ разработана эмпирическая формула времени прибытия КВМ, работа которой исследована: показано, что ее предсказательные характеристики лучше для быстрых КВМ, чем для медленных. В работе [Mittal, Narain, 2015] для вычисления времени прибытия используется простейшая модельная линейная зависимость между скоростью на вылете КВМ от Солнца и временем распространения до Земли; предлагаются к рассмотрению случаи медленных (<500 км/с) и быстрых (>500 км/с) КВМ. Статья [Michalick et al., 2004] содержит описание подхода к получению скорости КВМ, основанного на решении специальной оптимизационной задачи.

И, наконец, материал [Gopalswamy, 2016] является обзором истории изучения КВМ, в основном сконцентрированным на данных наблюдений и их систематизации. Вопросы диагностики и соответствующих моделей распространения КВМ подробно не обсуждаются.

К рассматриваемым здесь измерительным системам космического мониторинга относятся спутниковая система SOHO [Brueckner et al., 1995; Delaboudiniere et al., 1995] (проект NASA и ESA (European Space Agency)); спутниковая система STEREO [Howard et al., 2008] (проект NASA) и мюонный годоскоп (МГ) «Ураган» [Barbashina et al., 2008; Yashin et al., 2015] (проект НИЯУ МИФИ (РФ)).

Измерительная спутниковая система SOHO находится в точке Лагранжа, примерно в 1.5 млн. км от Земли. На ней установлены приборы наблюдения КВМ: ультрафиолетовый телескоп EIT (Extreme Ultraviolet Imaging Telescope) и коронограф LASCO (Large Angle and Spectrometric Coronagraph). EIT позволяет получать снимки на длинах волн 17.1, 19.5, 28.4 нм (линии железа) и 30.4 нм (линия гелия). Он может также снимать весь солнечный диск, его поле зрения составляет $1.5R_{\odot}$ (здесь R_{\odot} — солнечный радиус), разрешение 1024×1024 пиксела. LASCO представляет собой набор из трех коронографов с перекрывающимися полями зрения: от 1.1 до 3, от 1.5 до 6 и от 3.7 до $30R_{\odot}$. Коронографы работают в видимом диапазоне с разрешением 1024×1024 пиксела.

Измерительная спутниковая система STEREO (Solar TERrestrial RELations Observatory) состоит из двух спутников, выведенных на орбиты, близкие к орбите Земли, и вращается вокруг Солнца с периодами 346 и 388 дней. Радиусы орбит отличаются от радиуса орбиты Земли примерно на $\pm 4\%$, так что первый спутник постепенно удаляется от Земли вперед по орбите, а второй — назад. На борту каждого спутника STEREO установлены приборы наблюдения КВМ: модуль SECCHI (Sun Earth Connection Coronal and Heliospheric Investigation) — ультрафиолетовый телескоп EUVI (Extreme Ultraviolet Imager) с полем зрения до $1.7R_{\odot}$, два коронографа с полями зрения от 1.4 до 4 и от 2.5 до $15R_{\odot}$ и два широкоугольных телес-

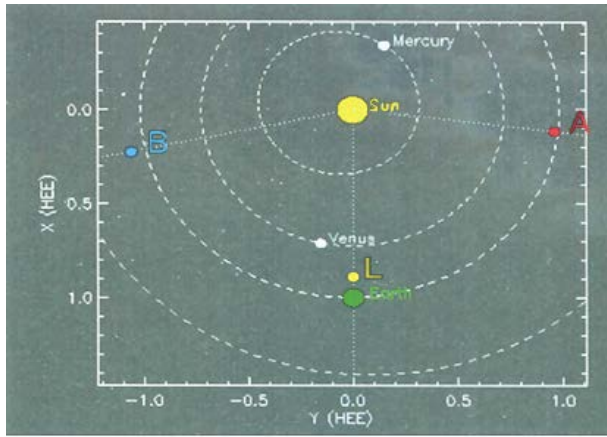


Рис. 1. Орбиты планет, положения Земли, Солнца, систем SOHO и STEREO

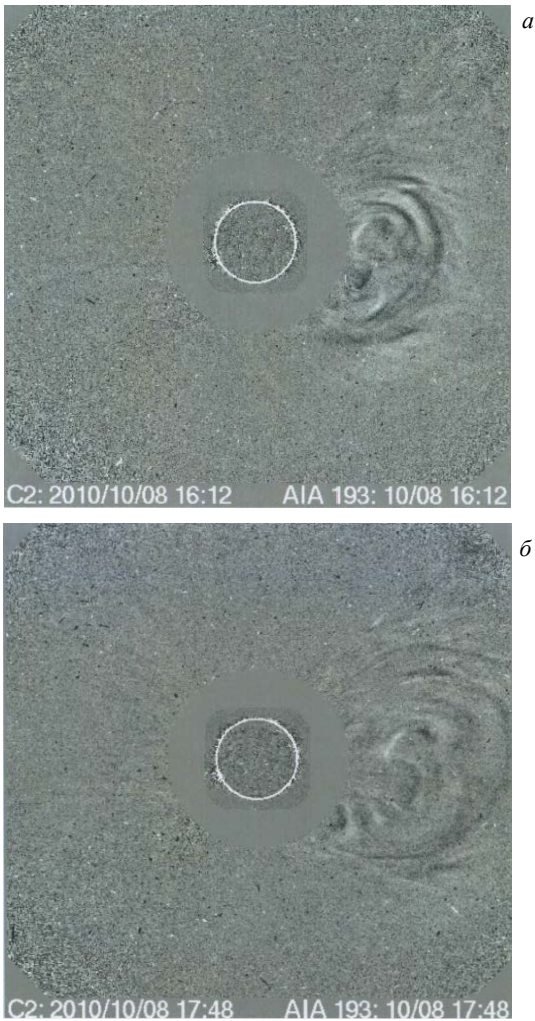


Рис. 2. Снимки KBM со спутниковой системы SOHO 08.10.2010, 16:12 (а), 17:48 (б)

копа, покрывающих углы от 4° до 24° и от 19° до 89° от Солнца $(15-84)R_\odot$ и $(66-318)R_\odot$ в плоскости орбиты Земли. Все приборы имеют разрешение 2048×2048 пикселей.

На рис. 1 штриховыми линиями изображены орбиты, точками — положения Земли, Солнца, измерительных систем SOHO (L) и STEREO (A, B), соответствующие дате 08.10.2010 [<https://stereo.gsfc.nasa.gov/where>].

На рис. 2, а, б показаны изображения KBM, полученные коронографом LASCO (SOHO) [<https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME>]. По изображению рис. 2, а прибли-

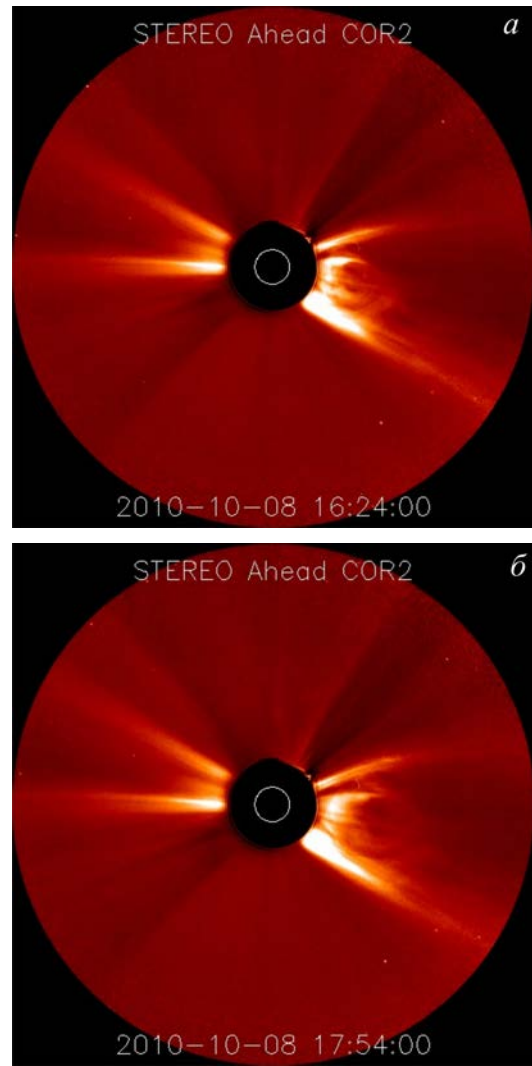


Рис. 3. Изображения KBM со спутниковой системы STEREO 08.10.2010, 16:24 (а) и 17:54 (б)

женно может быть оценено положение центра KBM относительно центра Солнца: видно, что в первом случае центр KBM находится на расстоянии $\approx 3.4R_\odot$, во втором случае на рис. 2, б центр KBM смещен на расстояние $\approx 4.2R_\odot$.

На рис. 3, а, б представлены изображения KBM от коронографа системы STEREO с полем зрения $(2.5 \div 15)R_\odot$ [<https://stereo.gsfc.nasa.gov/cgi>]. По снимкам рис. 3, а, б может быть определено приближенное положение центров KBM относительно центра Солнца: в первом случае центр KBM находится на расстоянии $\approx 5.1R_\odot$ от центра Солнца, во втором случае центр KBM смещается на расстояние $\approx 7.3R_\odot$.

Наблюдения систем SOHO и STEREO могут быть представлены последовательностями дискретных двумерных функций $S_1(i, j, T_1k)$, $S_2(i, j, T_2k)$, где индексам $(i, j) \in S_{01}$, $(i, j) \in S_{02}$ соответствуют дискретные наблюдения азимутальных и зенитных углов; S_{01} , S_{02} — области определения индексов; T_1 , T_2 — интервалы дискретности наблюдений. Алгоритм автоматического определения угловых положений KBM — оценки азимутальных $\varphi^\circ(T_1, 2k)$ и зенитных $\vartheta^\circ(T_1, 2k)$ углов — для данных систем может быть сформирован в первом приближении на основе вычисления соответствующих моментных характеристик функций $S_1(i, j, T_1k)$, $S_2(i, j, T_2k)$:

$$\begin{aligned} \varphi^\circ(T_{1,2}k) &= \left(\sum_{i,j \in S_{01,2}} iS_{1,2}(i,j,T_{1,2}k) \right) / \sum_{i,j \in S_{01,2}} S_{1,2}(i,j,T_{1,2}k), \\ \vartheta^\circ(T_{1,2}k) &= \\ &= \sum_{i,j \in S_{01,2}} jS_{1,2}(i,j,T_{1,2}k) / \sum_{i,j \in S_{01,2}} S_{1,2}(i,j,T_{1,2}k). \end{aligned} \quad (1)$$

Для плоского случая погрешность определения положения центра КВМ может составить величину $\Delta R_{SC} = \alpha R_S$, где R_S — радиус Солнца, α — заданный коэффициент. Погрешность углового азимутального положения КВМ может быть определена величиной $\Delta\varphi_{1,2} = \Delta R_{SC} / R_{SE}$, где R_{SE} — расстояние Солнце — Земля. Пусть $\alpha = 3.0$, $R_S = 0.004652 R_{SE}$, тогда имеем оценку погрешностей угловых положений $\Delta\varphi_{1,2} \approx 0.795^\circ$.

Измерительная наземная система «Ураган» на основе МГ осуществляет наблюдения функции угловых распределений интенсивностей мюонных потоков. Указанные наблюдения $S_3(i, j, T_3k)$, $i=1, \dots, N_1$, $j=1, \dots, N_2$ размещаются в информационных МГ-матрицах с шагом по времени $T_3=1$ мин. Наблюдения МГ реализуются в диапазоне $0^\circ \leq \varphi \leq 360^\circ$ и $0^\circ \leq \vartheta \leq 76^\circ$ по азимутальным и зенитным углам относительно земной системы координат с угловой дискретностью в $\Delta\varphi=4^\circ$, $\Delta\vartheta=1^\circ$; каждая МГ-матрица имеет размерность (N_1, N_2) , $N_1=90$, $N_2=76$. Угловое положение центра возможного КВМ может быть оценено на основе определения в МГ-матрицах аномальных угловых областей, связанных со снижением интенсивности мюонных потоков при возникновении КВМ-образований, с использованием формул, аналогичных (1).

Рисунок 4 показывает пример вычисления модуля $|\Delta S_3(i, j)|$ величины снижения интенсивностей мюонных потоков, полученных на основе цифровой обработки последовательностей МГ-матриц. Время наблюдения — 06.06.2015, 15:30.

Видно, что аномальная область для МГ-матрицы с максимальным значением модуля снижения интенсивности в данном случае может быть определена дискретными координатами $51 \leq i \leq 52$, $30 \leq j \leq 31$, что соответствует азимутальным и зенитным углам $204^\circ \leq \varphi_i \leq 208^\circ$, $30^\circ \leq \vartheta_j \leq 31^\circ$. При этом погрешность определения углового положения КВМ, наблюдаемого системой «Ураган», приближенно может составить величину $\Delta\varphi_{03} \approx (4^2 + 1^2)^{1/2} = 4.12^\circ$. С помощью первичной цифровой обработки последовательности $N_0=10 \div 15$ информационных МГ-матриц может быть достигнуто снижение угловых погрешностей до значений $\Delta\varphi_3 \approx \Delta\varphi_{30} / \sqrt{N_0} = (1.06^\circ \div 1.31^\circ)$.

Необходимо отметить, что с учетом принятых допущений, погрешность определения углового положения КВМ-образований от рассматриваемых измерительных систем может принять значение $\Delta\varphi_{1,2,3} \approx (0.5^\circ - 1.5^\circ)$. Следует заметить, что на сегодня отсутствуют реальные наблюдения с указанных систем; для расчетов в дальнейшем будем использовать модельные наблюдения.

В статье ставится задача ранней диагностики геомагнитных бурь на основе разработки метода и алгоритма цифровой обработки угловых наблюдений с измерительных систем космического мониторинга с учетом модели декартовых координат движения КВМ. С этой целью здесь предлагается процедура

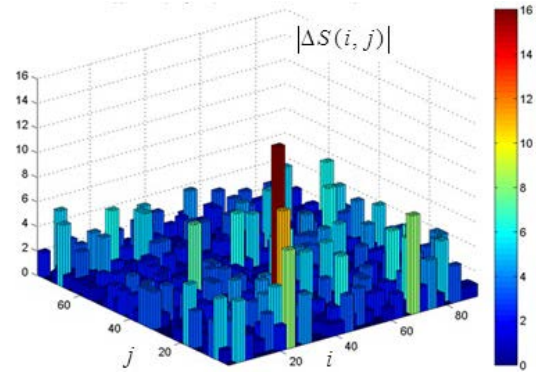


Рис. 4. Пример модуля функции величины снижения интенсивностей мюонных потоков

принятия решения о потенциально опасной близости КВМ к Земле, которая базируется на введенной функции прогноза расстояния между Землей и центром КВМ. Разрабатывается алгоритм оценивания параметров уравнений движения системы Земля — центр КВМ, основанный на минимизации функционала обобщенной триангуляции. Вычисляется функция прогноза расстояния и реализуется принятие решения по ранней диагностике путем сравнения минимального значения функции прогноза с заданным безопасным расстоянием Земля — центр КВМ. Для оценивания эффективности ранней диагностики применяется статистическое моделирование, основанное на моделях движений КВМ и модельных наблюдениях. Определяются оценки вероятностей ошибок процедуры принятия решений по ранней диагностике геомагнитных бурь.

Настоящая работа допускает возможность оценки угловых положений центров КВМ на основе цифровой обработки информации с измерительных систем космического мониторинга, расположенных в космическом пространстве и на Земле. Указанное оценивание может быть осуществимо, когда КВМ-образования находятся на расстоянии $\approx 0.05 - 0.2$ а.е. от поверхности Солнца (ближняя зона). В данном случае КВМ-образования имеют небольшие угловые размеры для наблюдений с орбиты Земли, и их можно с определенными допущениями принимать в виде перемещающихся в ближней зоне почти точечных областей [Xue et al., 2005].

Предлагаемое в статье решение по ранней диагностике отличается по своей постановке от [Owens, Cargill, 2004; Gopalswamy et al., 2000; Mittal, Narain, 2015; Michalick et al., 2004]. В статье для выработки решений заложена возможность применения реалистичной модели движения КВМ и использования текущих угловых наблюдений за КВМ. Подход [Odstrcil, 2003; Jin et al., 2017], связанный с применением модельных трехмерных уравнений магнитной гидродинамики, позволяет учитывать большее число характеристик солнечного ветра и КВМ по сравнению с феноменологическими моделями, но требует чрезвычайно больших вычислительных ресурсов.

1. МЕТОД РАННЕЙ ДИАГНОСТИКИ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ

Геометрическая схема движений системы Солнце — центр КВМ — Земля — измерительные системы кос-

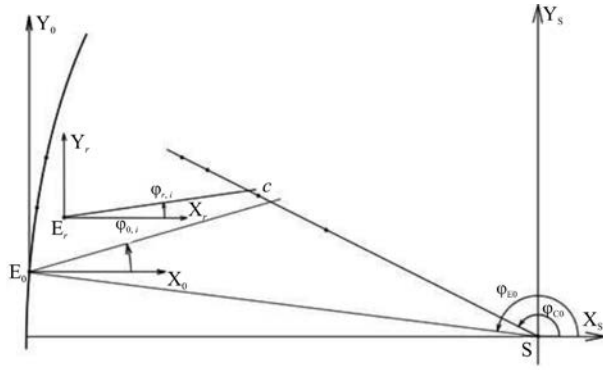


Рис. 5. Геометрическая схема движения системы Солнце — центр KBM — Земля — измерительные системы космического мониторинга

мического мониторинга для рассматриваемой задачи в 2D-случае показана на рис. 5.

Солнце (S), поместим в центре неподвижных прямоугольных декартовых координат \$X_s Y_s\$. Центр KBM обозначим C. Будем считать, что \$E_0\$ и \$X_0 E_0 Y_0\$ — это Земля и связанные с ней оси координат, параллельные \$X_s Y_s\$; \$E_r\$ и \$X_r E_r Y_r\$ — измерительные системы космического мониторинга с соответствующими осями координат, \$r=1, \dots, \bar{r}\$.

Пусть \$x_E(t)\$, \$y_E(t)\$ — декартовы координаты Земли, которые будем считать точно известными. Зададим нелинейные функции общего вида \$x_{CM}(c, t)\$, \$y_{CM}(c, t)\$, которые примем в качестве моделей декартовых координат перемещающегося центра KBM, зависящих от вектора параметров \$c^T=(c_1, \dots, c_{n_0})\$. В частности, эти функции могут быть полиномиальными — линейными, параболическими и т. д.; выбор функций моделей позволяет сформировать в достаточной степени произвольные траектории движений KBM в гелиосфере. Положим, что на некотором интервале времени \$(t_0, t_f)\$ по наблюдениям угловых координат KBM с измерительных систем и с учетом моделей декартовых координат KBM могут быть вычислены оценки вектора параметров \$c^\circ\$ и, соответственно, функций координат для центра KBM \$x_{CM}(c^\circ, t)\$, \$y_{CM}(c^\circ, t)\$. Реализуем прогнозирование положения центра KBM, введем функцию расстояния между Землей и центром KBM

$$R_{EC}(c^\circ, t) = \sqrt{(x_E(t) - x_{CM}(c^\circ, t))^2 + (y_E(t) - y_{CM}(c^\circ, t))^2}, \quad t_0 \leq t \leq t_f. \quad (2)$$

Для известной численной оценки вектора параметров \$c^\circ\$ функция \$R_{EC}(c^\circ, t)\$ является полностью определенной. Вычислим минимальное прогнозируемое расстояние между Землей и центром KBM. Примем величины временных границ \$t_0, t_f\$, для которых функция \$R_{EC}(c^\circ, t)\$ из (2) на интервале \$(t_0, t_f)\$ заведомо достигает своего минимума. Найдем минимум функции \$R_{EC}(c^\circ, t)\$ на рассматриваемом интервале, вычислим соответствующее время \$t^\circ(c^\circ)\$ и \$R_{EC}(c^\circ, t(c^\circ))\$ — величину минимального прогнозируемого расстояния:

$$t^\circ(c^\circ) = \arg \left\{ \min_{t_0 \leq t \leq t_f} R_{EC}(c^\circ, t) \right\},$$

$$R_{EC \min}^\circ = R_{EC}(c^\circ, t^\circ(c^\circ)). \quad (3)$$

Метод ранней диагностики геомагнитных бурь реализуем на основе процедуры принятия решения для проверки неравенства \$R_{EC \min}^\circ \leq \bar{R}_{EC}\$, где \$\bar{R}_{EC}\$ — задаваемое минимально безопасное расстояние Земля — KBM. В случае выполнения неравенства будем принимать решение, которое состоит в том, что центр возможного KBM находится достаточно близко от Земли и данный KBM представляет собой потенциальную опасность с точки зрения возникновения геомагнитной бури. В случае невыполнения неравенства будем принимать противоположное решение.

2. АЛГОРИТМ ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ ДВИЖЕНИЙ ЦЕНТРА KBM

2.1. Рассмотрим в общем виде алгоритм оценивания параметров модельных функций движения центра KBM. Обратимся к рис. 5. Положим, что наблюдения производятся в моменты времени \$t_{r,i}\$ и им соответствуют \$\phi_{r,i}\$ — угловые наблюдения за центром KBM, приведенные к системам координат \$X_r E_r Y_r\$ и отсчитываемые от оси \$E_r X_r\$ против часовой стрелки, \$r=0, 1, \dots, r-1; i=0, 1, \dots, N_r-1\$, где \$N_r\$ — число наблюдений, произведенных измерительной системой с индексом \$r\$; оси системы координат \$X_r E_r Y_r\$ перемещаются параллельно осям системы координат \$X_s Y_s\$.

Зависимости координат Земли \$x_E(t_{r,i})\$, \$y_E(t_{r,i})\$ от моментов времени \$t_{r,i}\$ определим с помощью следующих функций времени

$$\begin{aligned} \phi_E(t_{r,i}) &= \omega_E t_{r,i} + \phi_{E0}, \quad x_E(t_{r,i}) = R_{ES} \cos \phi_E(t_{r,i}), \\ y_E(t_{r,i}) &= R_{ES} \sin \phi_E(t_{r,i}), \end{aligned} \quad (4)$$

где \$\phi_{E0}\$, \$\omega_E\$, \$R_{ES}\$ — начальный угол, угловую скорость движения Земли по орбите вокруг Солнца и расстояние Солнце — Земля считаем заданными для (4). Координаты центра KBM для времен \$t_{r,i}\$ вычислим с помощью моделей заданного вида \$x_{CM}(c, t_{r,i})\$, \$y_{CM}(c, t_{r,i})\$ из п. 2. Запишем выражение для функционала обобщенной триангуляции \$S_{\bar{r}}(c, \phi)\$ в виде двойной суммы, физический смысл которой очевиден:

$$S_{\bar{r}}(c, \phi) = \sum_{r=1}^{\bar{r}} \alpha_r \times \sum_{i=0}^{N_r-1} \left(\phi_{r,i} - \arctg \frac{y_{CM}(c, t_{r,i}) - y_E(t_{r,i})}{x_{CM}(c, t_{r,i}) - x_E(t_{r,i})} \right)^2, \quad (5)$$

где \$\phi\$ — блочный вектор угловых наблюдений, \$\alpha_r\$ — весовые коэффициенты, учитывающие различные точности угловых наблюдений от рассматриваемых измерительных систем. Оценим вектор параметров \$c^\circ\$ с помощью минимизации функционала по ширине (5) по вектору параметров \$c \in \bar{C}\$, где \$\bar{C}\$ — ограничивающее множество \$c^\circ = \arg \left\{ \min_{c \in \bar{C}} S_{\bar{r}}(c, \phi) \right\}\$.

Множество \$\bar{C}\$ образуем системой неравенств \$c_{n, \min} \leq c_n \leq c_{n, \max}\$, \$n=1, \dots, n_0\$. Применим поисковый

метод минимизации нулевого порядка на основе прямого перебора для отыскания оптимальных оценок вектора параметров [Singiresu, 2009]. Организацию перебора — выработку дискретизованных параметров $c_n(k_n)$ — произведем на основе следующих соотношений:

$$c_n(k_n) = c_{n, \min} + \Delta c_n(k_n - 1),$$

$$\Delta c_n = (c_{n, \max} - c_{n, \min}) / (K_{fn} - 1), K_{fn} > 1, \quad (6)$$

где Δc_n — шаг перебора по параметрам, $k_n = 1, \dots, K_{fn}$, $n = 1, \dots, n_0$. Благодаря введенной дискретизации функционал (5) представим зависимым от k_1, k_2, \dots, k_m и нахождение оптимальных параметров c_n° в данном случае произведем на основе минимизационного поискового перебора по целочисленным переменным

$$(k_1^\circ, \dots, k_{n_0}^\circ) = \arg \left\{ \min_{k_n, n=1, \dots, n_0} S_1(k_1, \dots, k_{n_0}, \varphi) \right\},$$

$$c_n^\circ = c_n(k_1^\circ, \dots, k_{n_0}^\circ), n = 1, \dots, n_0. \quad (7)$$

2.2. Разберем случай одной измерительной системы, когда $\bar{F} = 1$, и определим моменты времени $t_0, \dots, t_i, i = 0, 1, \dots, N-1$. Для функций времени координат Земли $x_E(t_i), y_E(t_i)$ воспользуемся формулами (4). Рассмотрим простейший пример модели декартовых координат центра КВМ в виде линейных функций

$$x_{CM}(c, t_i) = R_{C0} + V_{C0} t_i \cos \varphi_{C0}, y_{CM}(c, t_i) = (R_{C0} + V_{C0} t_i) \sin \varphi_{C0}. \quad (8)$$

Для (8) центр КВМ перемещается равномерно и прямолинейно со скоростью V_{C0} под углом φ_{C0} , который отсчитывается от оси SX_x против часовой стрелки и в начальный момент времени находится на расстоянии R_{C0} от Солнца. В данном случае, представим трехмерный вектор параметров модели следующим образом $-c^T = (c_1, c_2, c_3)$, $c_1 = V_{C0}$, $c_2 = \varphi_{C0}$, $c_3 = R_{C0}$.

Для заданных t_i и наблюдений угловых положений φ_i центра КВМ, $i = 0, 1, \dots, N-1$ функционал триангуляции запишем в виде одинарной суммы

$$S_1(c, \varphi) = \sum_{i=0}^{N-1} \left(\varphi_i - \arctg \frac{y_{CM}(c, t_i) - y_E(t_i)}{x_{CM}(c, t_i) - x_E(t_i)} \right)^2.$$

Оптимальные параметры c_n° , $n = 1, 2, 3$ для модельных функций координат центра КВМ представим аналогично (7)

$$(k_1^\circ, k_2^\circ, k_3^\circ) = \arg \left\{ \min_{k_1, k_2, k_3} S_1(k_1, k_2, k_3, \varphi) \right\},$$

$$c_n^\circ = c(k_n^\circ), n = 1, 2, 3. \quad (9)$$

Данный пример здесь рассмотрен ввиду малых временных затрат, требуемых на вычисления параметров модели (8). Разумеется, более реалистичные модели движения КВМ в виде параболических и других функций вполне могут быть вычислены при больших временных затратах.

3. ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ ПО РАННЕЙ ДИАГНОСТИКЕ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ

Принятие решений по ранней диагностике геомагнитных бурь сформируем на основе оценок параметров модельных функций движений центра

КВМ $c_1^\circ = V_{C0}^\circ, c_2^\circ = \varphi_{C0}^\circ, c_3^\circ = R_{C0}^\circ$, полученных с использованием (9).

Для дискретных моментов времени $t_l, t_l = t_{j0} + \Delta t(l-1)$, с шагом $\Delta t = (t_j - t_{j0}) / (L_f - 1)$ вычислим, используя (2), последовательность значений функции прогноза расстояния между Землей и центром КВМ $R_{EC}(c^\circ, t_l), l = 1, \dots, L_f$:

$$R_{EC}(c^\circ, t_l) = \sqrt{(x_E(t_l) - (R_{C0}^\circ + V_{C0}^\circ t_l) \cos \varphi_{C0}^\circ)^2 + (y_E(t_l) - (R_{C0}^\circ + V_{C0}^\circ t_l) \sin \varphi_{C0}^\circ)^2}. \quad (10)$$

Для последовательности (10) найдем минимальное прогнозируемое расстояние Земля — КВМ $R_{EC \min}^\circ$

$$l^\circ = \arg \left\{ \min_{l=1, \dots, L_f} R_{EC}(c^\circ, t_l) \right\},$$

$$R_{EC \min}^\circ = R(c^\circ, t_{l^\circ}).$$

Процедура принятия решения состоит в проверке неравенства $R_{EC \min}^\circ \leq \bar{R}_{EC}$. При выполнении этого неравенства будем принимать решение, что центр КВМ находится достаточно близко от Земли и данный КВМ представляет собой потенциальную опасность с точки зрения возникновения геомагнитной бури. В случае невыполнения неравенства будем принимать противоположное решение.

Если оценки вектора параметров c° значительно отличаются от исходного вектора параметров c , то при реализации процедуры принятия решений возможны ошибки первого и второго рода.

1. При выполнении условия $R_{EC \min}(c) \geq \bar{R}_{EC}$ будет иметь место неравенство $R_{EC \min}(c^\circ) \leq \bar{R}_{EC}$, соответствующее случаю ложной КВМ-тревоги, который характеризуется условной вероятностью α

$$\alpha = P \left\{ R_{EC \min}(c^\circ) \leq \bar{R}_{EC} \right\}$$

для

$$R_{EC \min}(c) \geq \bar{R}_{EC}. \quad (11)$$

2. При выполнении условия $R_{EC \min}(c) < \bar{R}_{EC}$ будет иметь место неравенство $R_{EC \min}(c^\circ) > \bar{R}_{EC}$, соответствующее случаю пропуска КВМ, который характеризуется условной вероятностью

$$\beta = P \left\{ R_{EC \min}(c^\circ) > \bar{R}_{EC} \right\}$$

для

$$R_{EC \min}(c) < \bar{R}_{EC}. \quad (12)$$

Очевидно, что величина $1 - \beta$ представляет собой вероятность правильного решения по ранней диагностике.

4. ОЦЕНИВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕДУРЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО РАННЕЙ ДИАГНОСТИКЕ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ

Оценивание эффективности процедуры принятия решений по ранней диагностике геомагнитных бурь

реализовывалось посредством технологии статистического моделирования.

Задавалась последовательность моментов времени $t_i, t_i=0, 1, \dots, N-1$, численные значения начального условия и констант $\varphi_{E0}, \omega_E, R_{ES}$ и исходные параметры модельных функций декартовых координат центра КВМ $c_1=V_{C0}, c_2=\varphi_{C0}, c_3=R_{C0}$ для вычисления последовательности декартовых координат Земли $x_E(t_i), y_E(t_i)$ по (4) и модельных декартовых координат КВМ $x_{CM}(c, t), y_{CM}(c, t)$ по (8).

Вычислялась последовательность угловых положений $\varphi_{0,i}$ центра КВМ в системе координат $x_0E_0y_0$ для моментов времени $t_i, t_i=0, 1, \dots, N-1$.

$$\varphi_{0,i} = \arctg \frac{y_{CM}(c, t_i) - y_E(t_i)}{x_{CM}(c, t_i) - x_E(t_i)}.$$

Для проведения статистического моделирования формировались реализации последовательностей модельных случайных погрешностей $\delta\varphi_{s,i}$ распределенных по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и заданным среднеквадратичным отклонением (СКО) $\sigma, i=0, 1, \dots, N-1, s=1, \dots, M_0$, где M_0 — число реализаций. Формировались реализации угловых наблюдений $\varphi_{s,i}=\varphi_{0,i}+\delta\varphi_{s,i}, i=0, 1, \dots, N-1$, которые образовывали векторы наблюдений $\varphi_s^T=(\varphi_{s,0}, \varphi_{s,1}, \dots, \varphi_{s,N-1}), s=1, \dots, M_0$.

Выполнялись решения M_0 задач оптимизации (9) с наблюдениями φ_s . Для организации прямого перебора задавались число переборов $K_{fn}, n=1, 2, 3$, нижние границы поиска $c_{1,\min}, c_{2,\min}, c_{3,\min}$ шаги перебора $\Delta c_1=\Delta V_{C0}, \Delta c_2=\Delta \varphi_{C0}$ и $\Delta c_3=\Delta R_{C0}$, вычислялись $c_{n,\max}$ с использованием (6). Находились оптимальные параметры $c_{n,s}^\circ, n=1, 2, 3, s=1, \dots, M_0$ по (9). Для статистического моделирования задавалось число реализаций $M_0=100$. Принимались величины $K_{fn}=100, n=1, 2, 3, c_{1,\min}=250 \cdot 10^3$ м/с, $c_{21,\min}=145^\circ, c_{22,\min}=120^\circ, c_{3,\min}=75 \cdot 10^9$ м/с. Для надежной работы алгоритма — достижения приемлемой точности оценивания оптимальных параметров — оказалось необходимым производить минимизационный перебор с достаточно малым шагом: использовались шаги перебора $\Delta V_{C0}=5000$ м/с по скорости, $\Delta \varphi_{C0}=0.5^\circ$ по углу и $\Delta R_{C0}=1.5 \cdot 10^6 \cdot 10^3$ м по начальной дальности.

Моменты времени наблюдений для проведения расчетов определялись соотношением $t_i=t_H+T(i-1), t_H=0_H T=0.25 \cdot 3600$ с, $i=0, 1, \dots, N-1$. Были приняты значения начального угла $\varphi_{E0}=180^\circ$ и констант $\omega_E=2\pi/(365 \cdot 24 \cdot 3600)c^{-1}, R_{ES}=150 \cdot 10^9$ м. Задавались численные значения исходных параметров $c_1=V_{C0}=500 \cdot 10^3$ м/с, $c_3=R_{C0}=0.1 R_{ES}$.

Число наблюдений N , угол $c_2=\varphi_{C0}$ и значения заданных безопасных расстояний \bar{R}_{EC} варьировали в процессе статистического моделирования.

Порядок вычисления оценок вероятностей ошибок $\alpha^\circ, \beta^\circ$ состоял в проведении этапов:

1. Вычисления для задаваемого исходного вектора параметров c величины прогнозируемого минимального расстояния $R_{ECmin}(c)$.

2. Вычисления реализаций оценок векторов параметров c_s° и оценок величин минимальных расстояний $\bar{R}_{ECmin}(c_s^\circ), s=1, \dots, M$.

3. Вычисления оценок вероятностей α° и β° с помощью сравнения $\bar{R}_{ECmin}(c_s^\circ)$ и заданного значения \bar{R}_{EC} . При этом возможно следующее:

Ошибки первого рода — случай, когда в реальности имело место соотношение $R_{ECmin}(c) > \bar{R}_{EC}$; подсчитывалось число событий, когда $R_{ECmin}(c_s^\circ) \leq \bar{R}_{EC}$ и формировалась оценка вероятности ложной тревоги α° на основе (11), с использованием функции $\text{sign}(x)=1$ для $x>0$ и $\text{sign}(x)=0$ для $x \leq 0$:

$$\alpha^\circ = \frac{1}{M} \sum_{s=1}^M \text{sign}(\bar{R}_{EC} - R_{ECmin}(c_s^\circ)).$$

Ошибки второго рода — случай, когда в реальности имело место соотношение $R_{ECmin}(c) < \bar{R}_{EC}$; подсчитывалось число событий, когда $R_{ECmin}(c_s^\circ) \geq \bar{R}_{EC}$, и формировалась оценка вероятности пропуска β° с использованием (12):

$$\beta^\circ = \frac{1}{M} \sum_{s=1}^M \text{sign}(\bar{R}_{ECmin}(c_s) - R_{EC}).$$

По величине $1-\beta^\circ$ оценивалась вероятность правильного решения по ранней КВМ-диагностике геомагнитной бури.

На рис. 6, 7 представлены результаты вычислений оценок вероятностей $\alpha^\circ, 1-\beta^\circ$ ложных тревог и правильных решений по ранней КВМ-диагностике геомагнитной бури в зависимости от значений СКО угловых погрешностей наблюдений σ . Число наблю-

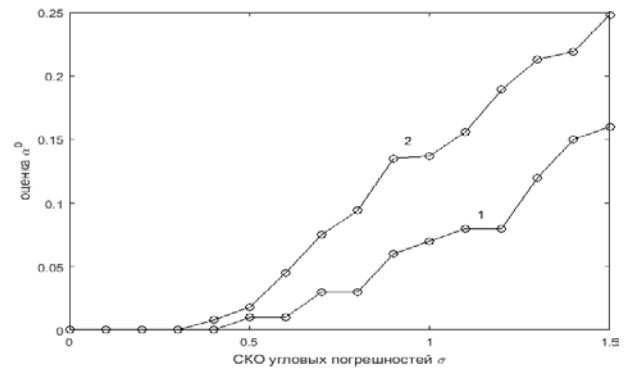


Рис. 6. Оценка вероятности α° ложного решения по ранней диагностике геомагнитной бури в зависимости от СКО угловых погрешностей σ

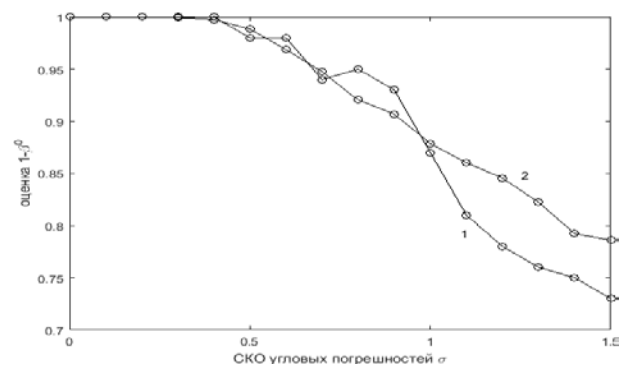


Рис. 7. Оценка вероятности $1-\beta^\circ$ ложного решения по ранней диагностике геомагнитной бури в зависимости от СКО угловых погрешностей σ

дений принималось равным $N=160$. Кривые с индексами 1, 2 соответствуют двум значениям безопасной дальности $\bar{R}_{EC1} = 20 \cdot 10^9$ м, $\bar{R}_{EC2} = 60 \cdot 10^9$ м. Для вычисления α° , $1-\beta^\circ$ для кривых с индексом 1 приняты значения углов КВМ $c_{21}=145^\circ$, $c_{22}=170^\circ$, кривых с индексом 2 — $c_{21}=156^\circ$, $c_{22}=151^\circ$.

Видно, что для угловых погрешностей с $\sigma \approx (0.5^\circ - 1.5^\circ)$ и безопасной дальности \bar{R}_{EC1} вероятности ложных и правильных решений составляют вполне приемлемые для практики значения $\alpha^\circ \approx 0.08$, $1-\beta^\circ \approx 0.85$; для значений \bar{R}_{EC2} характеристики диагностики по вероятностям ложных решений ухудшаются и принимают величины $\alpha^\circ \approx 0.15$, по вероятностям правильных решений, практически, не меняются — $1-\beta^\circ \approx 0.83$.

На основе анализа результатов статистического моделирования для числа наблюдений $N_{1,2}=20, 40$, $\bar{R}_{EC2} = 60 \cdot 10^9$ м и $c_{21}=156^\circ$ были получены оценки вероятностей ложных решений, которые возрастали до значений $\alpha_1^\circ \approx 0.25$, $\alpha_2^\circ \approx 0.38$ для диапазона угловых погрешностей $\sigma \approx (0.5^\circ - 0.7^\circ)$. Для малых N обеспечение приемлемых характеристик ранней диагностики может быть реализовано путем снижения угловых погрешностей наблюдений, достижимое на основе возможного усовершенствования подхода обобщенной триангуляции.

Результаты статистического моделирования оценок вероятностей показали, что предложенный метод и алгоритм ранней диагностики геомагнитных бурь оказались удовлетворительными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработанный метод и алгоритм ранней диагностики геомагнитных бурь на основе цифровой обработки угловых наблюдений с измерительных систем космического мониторинга с учетом моделей движений центров КВМ оказались удовлетворительно работоспособными.

2. Используемый в статье подход к ранней диагностике, основанный на обобщенной триангуляции, является адекватным рассматриваемой задаче и допускает возможное усовершенствование.

3. Статистическое моделирование, основанное на линейной модели движения КВМ и модельных наблюдениях, подтвердило возможность достижения приемлемой точности оценивания параметров модельных уравнений движений КВМ.

4. Оценки вероятности ошибок принятия решений, произведенные на основе статистического моделирования, подтвердили, что предложенный метод и алгоритм ранней диагностики геомагнитных бурь достаточно эффективны. Так, для СКО $\sigma \approx (0.5^\circ - 1.5^\circ)$ и при безопасном расстоянии $\bar{R}_{EC1} = 20 \cdot 10^9$ м вероятности ложных тревог и правильных решений составляют вполне приемлемые для практики значения $\alpha^\circ \approx 0.08$, $1-\beta^\circ \approx 0.85$.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 17-17-01215).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Barbashina N.S., Kokoulin P.A., Kompaniets K.G., et al. The URAGAN wide-aperture large-area muon hodoscope //

Instruments and Experimental Techniques. 2008. V. 51, N 2. P. 180–186.

Brueckner G.E., Howard R.A., Koomen M.J., et al. The large angle spectroscopic coronagraph (LASCO) // *Solar Phys.* 1995. V. 162, iss. 1-2. P. 357–402.

Delaboudiniere J.-P., Artzner G.E., Brunaud, J., et al. EIT: Extreme-Ultraviolet Imaging Telescope for the SOHO Mission // *Solar Phys.* 1995. V. 162, iss. 1-2. P. 291–312.

Gopalswamy N. History and development of coronal mass ejections as a key player in solar terrestrial relationship // *Geosci. Lett.* 2016. 3:8, DOI: [10.1186/s40562-016-0039-2](https://doi.org/10.1186/s40562-016-0039-2).

Gopalswamy N., Lara A., Lepping R.P., et al. Interplanetary acceleration of coronal mass ejection // *Geophys. Res. Lett.* 2000. V. 27. P. 145.

Handbook of Cosmic Hazards and Planetary Defense / Ed. J.N. Pelton, F. Allahdadi. Springer International Publishing, 2015. 1127 p.

Howard R.A., Moses J.D., Socker D.G., Dere K.P., Cook J.W. Secchi Consortium. Sun Earth connection coronal and heliospheric investigation // *Space Sci. Rev.* 2008. V. 136. P. 67–115.

Jin M., Manchester W.B., van der Holst B., et al. Data-constrained coronal mass ejections in a global magnetohydrodynamics model // *Astrophys. J.* 2017, V. 834. Iss. 2, article id. 173, 9 pp. DOI: [10.3847/1538-4357/834/2/173](https://doi.org/10.3847/1538-4357/834/2/173).

Michalick G., Gopalswamy N., Lara A., Manoham P.K. Arrival time of halo coronal mass ejection in the vicinity of the Earth // *Astron. Astrophys.* 2004. V. 423. P. 729.

Mittal N., Narain U.D. On the arrival of halo coronal mass ejection in the vicinity of the Earth // *J. Astron. Geophys.* 2015. V. 4. P. 100–105.

Odstroil D. Modeling 3-D solar wind structure // *Adv. Space Res.* 2003. V. 32, N 4. P. 497–506.

Owens M., Cargill P. Predictions of the arrival time of Coronal Mass Ejections at 1 AU: an analysis of the causes of errors // *Ann. Geophys.* 2004. V. 22. P. 661.

Singiresu S. Rao. Engineering Optimization // *Theory and Practice.* John Wiley & Sons, 2009. 813 p.

Solar Eruptions and Energetic Particles / Ed. N. Gopalswamy, R. Mewaldt, J. Torsti. Geophysical Monograph Ser. V. 165. American Geophysical Union, 2006. 385 p.

Xue X.H., Wang C.B., Dou X.K. An ice cream cone model for coronal mass ejections // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. P. A08103.

Yashin I.I., Astapov I.I., Barbashina N.S., et al. Real-time data of muon hodoscope URAGAN // *Adv. Space Res.* 2015. V. 56, iss. 12. P. 2693–2705.

URL: <http://helio-weather.net/archive/2008/05> (дата обращения 28 мая 2018).

URL: <https://stereo.gsfc.nasa.gov/where> (дата обращения 28 мая 2018).

URL: <https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME> (дата обращения 28 мая 2018).

URL: <https://stereo.gsfc.nasa.gov/cgi> (дата обращения 28 мая 2018).

REFERENCES

Barbashina N.S., Kokoulin P.A., Kompaniets K.G., Petrukhin A.A., Timashkov D.A., Chernov D.V., Shutenko V.V., Yashin I.I., Mannocchi G., Trincherro G., Saavedra O. The URAGAN wide-aperture large-area muon hodoscope. *Instruments and Experimental Techniques.* 2008, vol. 51, no. 2. P. 180–186.

Brueckner G.E., Howard R.A., Koomen M.J., Korendyke C.M., Michels D.J., Moses J.D., Socker D.G., Dere K.P., Lamy P.L., Llebaria A., Bout M.V., Schwenn R., Simnett G.M., Bedford D.K., Eyles C.J. The large angle spectroscopic coronagraph (LASCO). *Solar Phys.* 1995, vol. 162, iss. 1-2, pp. 357–402.

Delaboudiniere J.-P., Artzner G.E., Brunaud J., Gabriel, A.H., Hochedez J.F., Millier F., et al. EIT: Extreme-Ultraviolet Imaging Telescope for the SOHO Mission. *Solar Phys.* 1995, vol. 162, iss. 1-2, pp. 291–312.

Gopalswamy N. History and development of coronal mass ejections as a key player in solar terrestrial relationship. *Geosci. Lett.* 2016, 3:8, DOI: [10.1186/s40562-016-0039-2](https://doi.org/10.1186/s40562-016-0039-2).

Gopalswamy N., Lara A., Lepping R.P., Kaiser M.L., Berdichevsky D., St. Cyr O.C. Interplanetary acceleration of coronal mass ejection. *Geophys. Res. Lett.* 2000, vol. 27, pp. 145.

Handbook of Cosmic Hazards and Planetary Defense / Ed. J.N. Pelton, F. Allahdadi. Springer International Publishing. 2015, 1127 p.

Howard R.A., Moses J.D., Socker D.G., Dere K.P., Cook J.W., Secchi Consortium. Sun Earth connection coronal and heliospheric investigation. *Space Sci. Rev.* 2008, vol. 136, pp. 67–115.

Jin M., Manchester W.B., van der Holst B., Sokolov I., Tóth G., Mullinix R.E., Taktakishvili A., Chulaki A., Gombosi T.I. Data-constrained coronal mass ejections in a global magnetohydrodynamics model. *Astrophys. J.* 2017, vol. 834, iss. 2, article id. 173, 9 pp. DOI: [10.3847/1538-4357/834/2/173](https://doi.org/10.3847/1538-4357/834/2/173).

Michalick G., Gopalswamy N., Lara A., Manoham P.K. Arrival time of halo coronal mass ejection in the vicinity of the Earth. *Astron. Astrophys.* 2004, vol. 423, pp. 729.

Mittal N., Narain U.D. On the arrival of halo coronal mass ejection in the vicinity of the Earth. *J. Astron. Geophys.* 2015, vol. 4, pp. 100–105.

Odstrcil D. Modeling 3-D solar wind structure. *Adv. Space Res.* 2003, vol. 32, no. 4, pp. 497–506.

Owens M., Cargill P. Predictions of the arrival time of Coronal Mass Ejections at 1AU: an analysis of the causes of errors. *Ann. Geophys.* 2004, vol. 22, pp. 661.

Singiresu S. Rao. Engineering Optimization. *Theory and Practice*. John Wiley & Sons. 2009, 813 p.

Solar Eruptions and Energetic Particles / Ed. N. Gopalswamy, R. Mewaldt, J. Torsti. Geophysical Monograph Ser. V. 165. American Geophysical Union. 2006, 385 p.

Xue X.H., Wang C.B., Dou X.K. An ice cream cone model for coronal mass ejections. *J. Geophys. Res.* 2005, vol. 110, pp. A08103.

Yashin I.I., Astapov I.I., Barbashina N.S., Borog V.V., Chernov D.V., Dmitrieva A.N., et al. Real-time data of muon hodoscope URAGAN. *Adv. Space Res.* 2015, vol. 56, iss. 12, pp. 2693–2705.

URL: <http://helio-weather.net/archive/2008/05> (accessed May 28, 2018).

URL: <https://stereo.gsfc.nasa.gov/where> (accessed May 28, 2018).

URL: <https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME> (accessed May 28, 2018).

URL: <https://stereo.gsfc.nasa.gov/cgi> (accessed May 28, 2018).

Как цитировать эту статью

Гетманов В.Г., Гвишиани А.Д., Перегудов Д.В., Яшин И.И., Соловьев А.А., Добровольский М.Н., Сидоров Р.В. Ранняя диагностика геомагнитных бурь на основе наблюдений систем космического мониторинга. *Солнечно-земная физика*. 2019. Т. 5, № 1. С. 59–67. DOI: [10.12737/szf-51201906](https://doi.org/10.12737/szf-51201906).