ПРОГНОЗ СИЛЬНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ ПО СОВОКУПНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК И ВЫБРОСОВ КОРОНАЛЬНОЙ МАССЫ

Буров В.А.¹, Бруевич Е.А.², Очелков Ю.П.¹

¹ИИГ Росгидромета им. Е.К. Федорова, Москва, Россия

²МГУ им. М.В. Ломоносова, Государственный астрономический институт
им. П.К. Штернберга, Москва, Россия

FORECAST OF STRONG PERTURBATIONS OF THE EARTH'S MAGNETIC FIELD FROM THE COMBINED CHARACTERISTICS OF SOLAR FLARES AND CORONAL MASS EMISSIONS

Burov V.A.¹, Bruevich E.A.², Ochelkov Yu.P.¹

¹Fedorov Institute of Applied Geophysics, Moscow, Russia

²Lomonosov Moscow State University, Sternberg State Astronomical Institute,
Moscow, Russia

In the practical work of the analytical center of the Institute of Applied Geophysics (IAG), it is desirable to have IAG's own simple computerized system for assessing the probability of the occurrence of large (with $K_p \geq 7$) magnetic storms and the time of their onset. The proposed work is devoted to the development of just such a technique. It is assumed here that the explosive processes occurring on the Sun are common to CMEs and flares. The close relationship between the characteristics of flares and CMEs makes it possible to predict the perturbed state of the Earth's magnetosphere by analyzing the totality of observational data on flares and CMEs, considering them to be related phenomena. There is this approach to the construction of the prognostic scheme that was applied in our work.

DOI: 10.31725/0552-5829-2019-63-66

Интенсивность магнитной бури (индексы Dst и K_p) и время ее прогнозируемого максимума зависят от следующих факторов: параметров корональных выбросов массы (КВМ); расположения активной области (АО) на Солнце, класса рентгеновской вспышки; X-флюенса (интегрального потока от начала до $\frac{1}{2}$ максимума) вспышки; наличия сильных протонных событий, связанных со вспышками (максимум потока протонов регистрируется через несколько часов после максимума вспышки).

Из рис. 1 видно, что от момента начала вспышки, который регистрируется со спутника GOES-15 в режиме реального времени до наступления значительного геомагнитного возмущения, проходит в среднем (согласно событиям 23-го цикла) от 10 до 20 часов.

Из рис. 2 следует, что, если событие попадает в полосу $V_{\text{КВМ}} \geq 1000$ км/сек и $|Dst| \geq 100$, то вероятность, что $K_p \geq 7$ равна $25/30 = 0.83$, вероятность ложного события – $5/30 = 0.17$.

Таким образом, критической величиной $V_{\text{КВМ}}$ для прогноза крупных магнитных бурь, является величина $V_{\text{КВМ}} = 1000$ км/сек.

Рис. 1. Оценка временной задержки между началом события на Солнце и моментом начала сильного возмущения магнитного поля Земли. Слева: Временная задержка от начала вспышки до события $|Dst| \geq 100$. Справа: Временная задержка от начала вспышки до события с $Kp \geq 7$.

Рис. 2. Взаимосвязь между $|Dst|$ и $V_{\text{КВМ}}$ за 23-й цикл с учетом зависимости от величины Кр-индекса. Красные заполненные кружки соответствуют событиям с $Kp \geq 7$.

Рис. 3. Взаимосвязь между потоком протонов $I_{\text{пр}} (\geq \text{МэВ})$ в максимуме и X-флюенсом L в 23-м цикле.

На рис. 3 – крупные полые кружки соответствуют $|Dst| \geq 100$, крупные заполненные кружки – $|Dst| \geq 120$. Протонные события учитываются при превышении $I_{\text{пр}}$ величины 5 pfu. Видно, что, если событие попадает в полосу $I_{\text{пр}} \geq 100$ (для частиц с энергией ≥ 10 MeV) и $L \geq 0.15$, то вероятность

того, что $|Dst| \geq 100$ будет $19/28 = 0.68$, вероятность ложного события $9/28 = 0.32$, поэтому, критической величиной для прогноза крупных магнитных бурь ($|Dst| \geq 100$), является величина $I_{pr} (\geq 10 \text{ MeV})$, равная 100 pfu.

Рис. 4. Слева: Взаимосвязь между скоростью $V_{КВМ}$ и X-флюенсом L (J/m^2) за 23-й цикл с учетом зависимости от величины Dst-индекса. Крупные полые кружки – $|Dst| \geq 100$, крупные красные заполненные кружки – $|Dst| \geq 120$. Справа: Взаимосвязь между $|Dst|$ и $I_{pr} (\geq 10 \text{ MeV})$ за 23-й цикл с учетом зависимости от величины Kp-индекса. Синие заполненные кружки соответствуют событиям с $Kp \geq 7$.

Из рис. 4 следует, что, если событие попадает в полосу $V_{КВМ} \geq 1000$ км/сек и $L \geq 0.25$, то вероятность, что $|Dst| \geq 100$ будет $17/28 = 0.61$, вероятность ложного события $11/28 = 0.39$. Если событие попадает в полосу $|Dst| \geq 100$ и $I_{pr} \geq 100$ pfu, то вероятность, что $Kp \geq 7$ равна $25/29 = 0.86$, вероятность ложного события – $4/29 = 0.14$. Таким образом, критической величиной для прогноза крупных магнитных бурь, является величина $I_{pr} \geq 100$ pfu. Вышеизложенные результаты обобщены в рис. 5.

Рис. 5. Блок-схема прогноза события $|Dst| \geq 100$ по наблюдениям КВМ и вспышек.

Вероятности события $|\text{Dst}| \geq 100$ – для всех KBM типа «HALO» type 23-го цикла (140 событий) и стольких же событий KBM типа «NO HALO» type 23-го цикла. Учитываются вспышки класса $\geq M1$.

Таблица 1.

CME of HALO type	CME of NO HALO type
$W(1,1, 1,1) = 0.7$	$W(0,1, 1,1) = 0.65$
$W(1,1, 1,0) = 0.1$	$W(0,1, 1,0) = 0.1$
$W(1,1, 0,1) = 0.65$	$W(0,1, 0,1) = 0.6$
$W(1,1, 0,0) = 0.03$	$W(0,1, 0,0) = 0.05$
$W(1,0, 1,1) = 0.6$	$W(0,0, 1,1) = 0.6$
$W(1,0, 1,0) = 0.1$	$W(0,0, 1,0) = 0.025$
$W(1,0, 0,1) = 0.55$	$W(0,0, 0,1) = 0.55$
$W(1,0, 0,0) = 0.05$	$W(0,0, 0,0) = 0.025$

При переходе от вероятностного прогноза к детерминированному ниже все прогностические вероятности меньше заданной заменяются на 0%, а больше заданной заменяются на 100%. В нашем случае заданная вероятность (решающее правило) равна 50%, см. таблицу 2.

Таблица 2.

Наблюдения / Прогноз	Событие было ($ \text{Dst} \geq 100$)	События не было ($ \text{Dst} < 100$)
Прогноз положительный	$N_{11} = 36$	$N_{12} = 7$
Прогноз отрицательный	$N_{21} = 12$	$N_{22} = 695$

В таблице 2 рассмотрены 140 событий с KBM of HALO TYPE и 610 событий с KBM of NO HALO type 23-го цикла. Учитываются все вспышки класса $\geq M1$ 23-го цикла, где N_{11} = Прогноз положительный и событие было, N_{12} = Прогноз положительный, но события не было, N_{21} = прогноз отрицательный, но событие было, N_{22} = прогноз отрицательный, и события не было.

POD (a probability of detecting) = $\text{POD} = N_{11}/(N_{11}+N_{21}) = 29/36 = \mathbf{0.75}$

FAR (a false alarm ratio) = $N_{12}/(N_{11}+N_{12}) = 7/36 = \mathbf{0.165}$.

Литература

1. <http://sidc.oma.be/CACTus> / (выбор KBM с HALO, KBM с NO HALO, оценка величины V_{KBM}).
2. <https://sohowww.nascom.nasa.gov/data/realtime/c2/512/> (оценка $F_{\text{SXR}}^{\text{max}}$).
3. <http://space-weather.ru/index.php?page=Proton-flux-24-hours-ru> (оценка $I_{\text{pr}} \geq 10 \text{ MeV}$ ($\geq 100 \text{ pfu}$, $< 100 \text{ pfu}$) – данные GOES-15).