

## Роль параметров плазмы солнечного ветра в формировании начальной фазы геомагнитных бурь

А.М.Чхетия

Результаты теоретических исследований Чепмена - Ферраро и Мида [1, 2] показали, что начальная фаза геомагнитной бури (DCF возмущение) объясняется двумя факторами - поджатием дневной границы магнитосферы и увеличением интенсивности индуцированных токов на поверхности магнитопаузы, за счет увеличения динамического давления солнечного ветра на геомагнитное поле. Связь между увеличением DCF поля на поверхности Земли ( $V_{DCF}$ ) и давлением солнечного ветра ( $P = m_p n v^2$ ) выражается формулой

$$V_{DCF} = k(v_t \sqrt{n_t} - v_0 \sqrt{n_0}), \quad (1)$$

где  $V_{DCF}$  - увеличение поля DCF тока на поверхности геомагнитного экватора, выражаемое в нанотеслах;  $v$  - скорость потока солнечного ветра в км/сек;  $n$  - концентрация протонов в  $\text{см}^{-3}$ ; индекс  $t$  относится к моменту времени максимального увеличения DCF-поля, а индекс  $0$  - спокойному уровню, непосредственно предшествующему началу магнитной бури,  $k$  - коэффициент связи с размерностью  $\text{нТл.см}^{3/2} \cdot \text{с.км}^{-1}$ . Коэффициент связи у Мида равен  $3.05 \cdot 10^{-2}$ , тогда как у Чепмена-Ферраро  $-6.4 \cdot 10^{-3}$ .

В экспериментальных работах, для проверки формулы (1), параметры динамического давления плазмы солнечного ветра ( $n, v$ ) определялись по непосредственным измерениям, выполненным в межпланетном пространстве (с помощью межпланетных станций и искусственных спутников Земли), а геомагнитное поле по  $D_{st}$  индексу. Поскольку  $D_{st}$  индексы отражают временные вариации интенсивности внеионосферных токовых систем, текущих на магнитопаузе (DCF) и в радиационной зоне (DR), то увеличение поля DCF тока на поверхности Земли определяют по формуле

$$\Delta D_{st} = k(v_t \sqrt{n_t} - v_0 \sqrt{n_0}) + b, \quad (2)$$

где  $b = -(V_{DCF}^q + V_{DR}^q)$ , индекс  $q$  означает, что он относится к самым спокойным дням геомагнитного поля; член  $-b$  определяет нулевой уровень отсчета  $N$  компоненты. По данным отдельных работ,  $b$  характеризуется значительным разбросом, что объясняется неопределенностью нулевого уровня отсчета, за счет заметного изменения величин  $V_{DCF}^q$  и  $V_{DR}^q$ , от бури к буре.

Исследования, проведенные автором, на основании сопоставления данных прямых измерений параметров плазмы солнечного ветра и геомагнитной активности ( $D_{st}$ -индекса) во время начальной фазы геомагнитных бурь (DCF-возмущения), позволили установить [3-7]:

1. DCF возмущения нельзя объяснить только усилением динамического давления солнечного ветра на магнитосферу Земли [3].

На основе корреляционного анализа, методом наименьших квадратов, было найдено, что увеличение DCF поля на поверхности Земли, в период начальной фазы геомагнитной бури ( $V_{DCF}$  определяемое по  $D_{st}$ -индексу, в нТл-ах) с давлением солнечного ветра можно выразить соотношением

$$\Delta D_{st} = 18.9 + 0.98 \cdot 10^{-2} (\sqrt{v_1} - \sqrt{v_0}),$$

следовательно, значение  $K = 0.98 \cdot 10^{-2} \text{ нТл} \cdot \text{см}^{3/2} \cdot \text{с} \cdot \text{км}^{-1}$ . Если учесть диамагнетизм Земли, который увеличивает значение однородной гармоники на экваторе в 3/2 раза, то получим, что с учетом поправочного коэффициента (Земля)  $K = 0.65 \cdot 10^{-2}$ , что в 4.7 раза меньше чем в модели Мида, и практически совпадает с моделью Чепмена-Ферраро. Коэффициент корреляции между искомыми величинами низкий  $r = 0.58 \pm 0.04$

На рис. 1. приведена связь между разностями  $D_{st}$ -индекса ( $\Delta D_{st}$ ) и квадратным корнем из давления солнечного ветра ( $\Delta \sqrt{p}$ ).

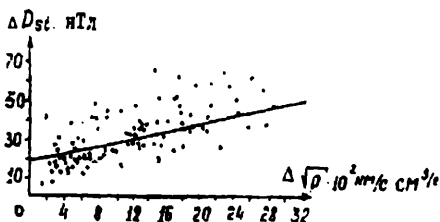


Рис.1 Зависимость амплитуды DCF-возмущений от величины  $\Delta(\text{пмв}^2)^{\frac{1}{2}}$

Из рис. 1 видно, что имеется довольно сильный разброс точек, а коэффициент корреляции между  $D_{st}$ -индексом и квадратным корнем из динамического давления солнечного ветра мал:  $r = 0.58 \pm 0.04$ . Низкий коэффициент корреляции между искомыми величинами указывает на то, что увеличение напряженности геомагнитного поля в начальной фазе геомагнитных бурь (DCF-возмущение) нельзя объяснить только усилением динамического давления солнечного ветра на магнитосферу Земли.

2. Ключевыми параметрами плазмы солнечного ветра, ответственными за формирование начальной фазы геомагнитной бури (DCF - возмущения), являются - концентрация солнечного ветра ( $n$ ) и северноразрушенная  $B_z$  компонента ММП ( $B_z > 0$ ) [4].

Для выявления влияния отдельных параметров солнечного ветра на развитие DCF и DR-возмущений, бури были объединены в четыре группы:

- 1) малые бури, содержащие только начальную фазу ( без главной фазы);
- 2) умеренные бури, содержащие DCF-возмущения, со слабо выраженной главной фазой ( $DR \leq 50$  нТл);
- 3) типичные геомагнитные бури с хорошо выраженной начальной фазой и сильной депрессией геомагнитного поля в главной фазе ( $DR > 50$  нТл);
- 4) большие бури без начальной фазы, но с сильной депрессией геомагнитного поля в главной фазе ( $DR > 50$  нТл).

На рис. 2 приведены усредненные методом наложения эпох кривые вариации геомагнитного поля ( $D_{st}$ ) и параметров плазмы солнечного ветра для вышеуказанных четырех групп магнитных бурь. При построении графиков рис.2 было отобрано 158 случаев магнитных бурь, которые по группам распределились следующим образом: I-60, II-41, III-28, IV-29.

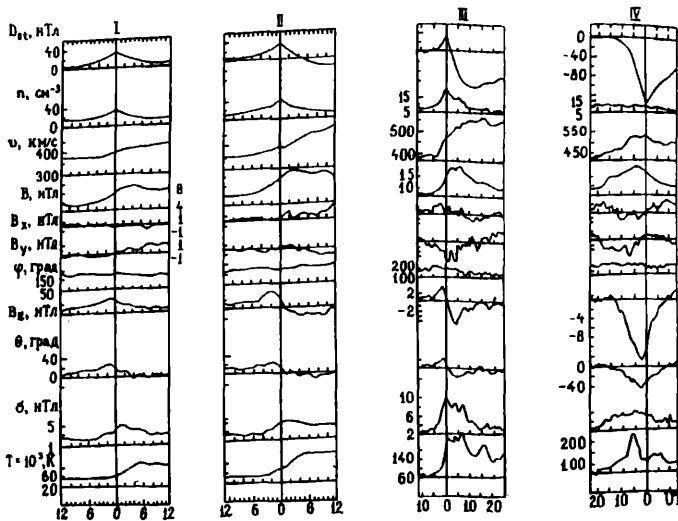


Рис. 2. Усредненные вариации  $D_{st}$ -возмущений и параметров плазмы солнечного ветра для четырех групп магнитных бурь. Пояснения в тексте.

Анализ кривых рис. 2 показывает, что в период начальной фазы геомагнитных бурь , проявляются следующие закономерности:

1. между вариациями  $D_{st}$ -индекса и протонной концентрацией плазмы солнечного ветра ( $n$ ) наблюдается явно выраженная корреляционная связь с синхронным ходом.

2. компоненты напряженности межпланетного магнитного поля  $B_x, B_y$  и долготный угол  $\phi^0$  не коррелируют с  $D_{st}$ -индексом. Следовательно, изменения напряженности межпланетного магнитного поля как по модулю, так и по направлению в плоскости эклиптики не влияют на развитие DCF-возмущений.

3.  $B_z$ -составляющая межпланетного магнитного поля и широтный угол  $\theta^0$  с опережением на 1-2 ч обнаруживают тесную корреляционную связь с  $D_{st}$ -индексом.

Из вышесказанного следует, что основными ключевыми параметрами плазмы солнечного ветра , ответственными за формирование начальной фазы геомагнитной бури (DCF-возмущения), являются - концентрация солнечного ветра ( $n$ ) и северно направленная  $B_z$ -компонента ММП ( $B_z > 0$ ). Следовательно, логично согласиться с мнением Т.В.Кузнецовой и Т.В.Шеванино [8], что "классическая методика определения DCF-поля на поверхности Земли (формула Мида (1)) может оказаться неверной, так как она не зависит от  $B_z$ - компоненты ММП".

3. Если исключить влияние  $B_z$  компоненты ММП на DCF-возмущения (критерием отбора данных в период DCF-возмущений  $B_z > 0$ ), то связь DCF-поля на поверхности Земли с изменением динамического давления солнечного ветра, лучше проявляется не в зависимости от разности  $(\sqrt{p_1} - \sqrt{p_0})$ , (как принято в работе Мида), а от логарифма отношения  $p_1 / p_0$  [5] -

$$B_{DCF} = 20 \ln \frac{P_t}{P_0}, \quad (3)$$

где индексы  $t$  и  $o$  характеризуют значения динамического давления солнечного ветра в моменты максимума и минимума (до бури) DCF- возмущений, соответственно.

На рис. 3 показана зависимость поля  $B_{DCF}$ -тока на поверхности Земли (вычисленных по эмпирической формуле -3) от экспериментальных значений  $\Delta D_{st}$ .

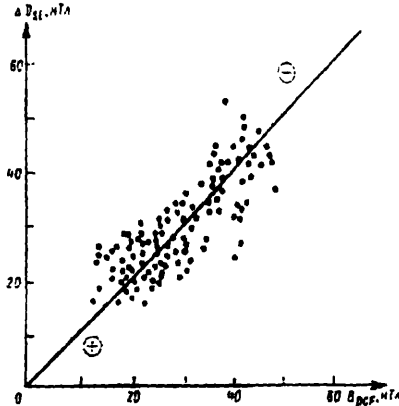


Рис. 3. Зависимость вычисленных по формуле (3) значений DCF-поля от экспериментальных значений  $\Delta D_{st}$ .

На рис 3 видно, что разброс точек относительно биссектрисы угла, образованного осями координат, находится в относительно узком интервале. Следовательно, предлагаемую формулу можно считать вполне приемлемой. Сравнение формул (2) и (3) показывает, что формула (3) легко реализуема для конкретных случаев бурь, так как в нее не входит поправка "постоянного" члена  $b$ .

4. Эффект DCF тока на поверхности Земли, кроме динамического давления солнечного ветра, зависит и от азимутальной компоненты электрического поля в солнечном ветре. Связь DCF-поля на поверхности Земли ( $B_{DCF} = \Delta D_{st}$ , в нТл) с параметрами плазмы солнечного ветра выражается соотношением [6] –

$$B_{DCF} = A \ln \frac{P}{P_0} - B(\bar{E}_{y,t-1} - \bar{E}_{y,o-1}), \quad (4)$$

где  $A=18.8$  нТл;  $B=3,5 \cdot 10^{-3}$ ;  $P$ - динамическое давление солнечного ветра;  $E_y$  -азимутальная компонента электрического поля в солнечном ветре ( $E_y = -B_z v$ , где  $B_z$  в нТл, а  $v$  км.сек $^{-1}$ );  $\bar{E}_{y,t-1} = -\bar{B}_{z,t-1} V_{t-1}$ .  $\bar{B}_{z,t-1} = \frac{B_{z,t} + B_{z,t-1} + B_{z,t-2}}{3}$  индексы  $o, t$  относятся к моментам времени (в часах) минимума (до начала бури) и максимума DCF-возмущений, соответственно. Из формулы (4) следует, что если  $\Delta E_y < 0$  ( $B_z > 0$ ), даже при постоянстве динамического

давления солнечного ветра, DCF - поля в начальной фазе геомагнитной бури должны увеличиваться, однако таких случаев обнаружить нам не удалось.

5. Окончательно была построена эмпирическая формула, связывающая DCF поля токов на поверхности Земли в период начальной фазы геомагнитных бурь со среднечасовыми параметрами солнечного ветра и межпланетного магнитного поля [4,7] -

$$\begin{cases} B_{DCF} = A \exp[-a(\bar{E}_{y,t-1} - \bar{E}_{y,0-1})] \ln \frac{P_t}{P_0}, \\ \text{при } E_y < 0.5 \frac{\text{мВ}}{\text{М}}, \end{cases} \quad (5)$$

где  $A = 18.8$  нТл,  $a = 65 \cdot 10^{-6}$ ,  $P$  - динамическое давление солнечного ветра ( $P = \rho n v^2$ ),  $E_y$  - азимутальная компонента электрического поля в солнечном ветре ( $E_y = -B_z v$ ),  $\bar{E}_{y,t-1} = -\bar{B}_{z,t-1} v_t$  (нТл.км/сек),  $\bar{B}_{z,t-1} = \frac{\bar{B}_{z,t} - \bar{B}_{z,t-1} - \bar{B}_{z,t-2}}{3}$ , индексы  $0, t$  относятся к моментам времени (в часах) минимума (до бури) и максимума DCF-возмущений, соответственно. Индекс  $(t-1)$  учитывает физический факт того, что эффект усиления поля DCF-тока на Земле (обусловленное увеличением динамического давления солнечного ветра на магнитосферу Земли  $P_t/P_0$ ) обусловлен заранее (в среднем на 1 час) сформировавшимся состоянием магнитосферы (связанное азимутальной компонентной электрического поля в солнечном ветре). Критерии отбора данных  $-E_y < 0.5 \frac{\text{мВ}}{\text{М}}$  указывает, что в период DCF возмущений магнитосфера находилась в закрытом состоянии, т.е. не происходила эрозия границы магнитосферы, а следовательно, отсутствовало условие для дополнительной инъекции частиц солнечного ветра в область кольцевого DR-тока.

На рис. 4 представлена зависимость между DCF-полями на поверхности Земли  $B_{DCF}$  - рассчитанная по параметрам плазмы солнечного ветра ( по формуле -5),  $\Delta D_{st}$  - экспериментальные значения (определяемые по  $D_{st}$ -индексу)

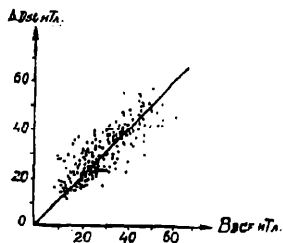


рис. 4. Зависимость вычисленных по формуле (5) значений DCF-поля на поверхности Земли ( $B_{DCF}$ ) от экспериментальных значений  $\Delta D_{st}$ .

Из рис. 4 видно, что разброс точек относительно биссектрисы угла, образованный осями координат, находится в относительно узком интервале (коэффициент корреляции между величинами  $B_{DCF}$  и  $\Delta D_{st}$   $\gamma = 0.83 \pm 0.02$ ). Отметим, что между изменением динамического давления солнечного ветра (вычисленным по формуле Мида) и  $\Delta D_{st}$   $\gamma = 0.58 \pm 0.04$ . Следовательно, предлагаемую формулу (5) можно считать вполне приемлемой.

На рис. 5 и 6 показано, как при помощи среднечасовых параметров межпланетной среды (по данным каталога Кинга [9]), формула (5) может воспроизводить временные вариации  $D_{st}$ -индекса [10] в период начальной фазы некоторых магнитных бурь [11]. На рис. 5 приведены классические геомагнитные бури - бури с хорошо выраженной начальной фазой и последующей депрессией геомагнитного поля в главной фазе. На рис. 6 приведены возмущения типа  $S_1$ - малые бури, содержащие только начальную фазу (DCF-возмущения) без развития главной фазы.

На рис. 5 и 6 введены следующие обозначения - сплошные кривые, DCF-возмущения, наблюдаемые на поверхности Земли по  $D_{st}$ -индексу, а пунктирные - по формуле (5) вычисленные DCF-поля на поверхности Земли.

В таблице 1 даны характеристики магнитных бурь (приведенных на рис. 5 и 6) - моменты максимумов DCF-возмущений, классификация бурь, амплитуды DCF-возмущений ( $\Delta D_{st}$  - наблюдаемые увеличения по  $D_{st}$ -индексу,  $V_{DCF}$  - вычисленные DCF поля на поверхности Земли по формуле Мида  $V_{DCF,1}$  и по формуле (5)  $V_{DCF,2}$ ).

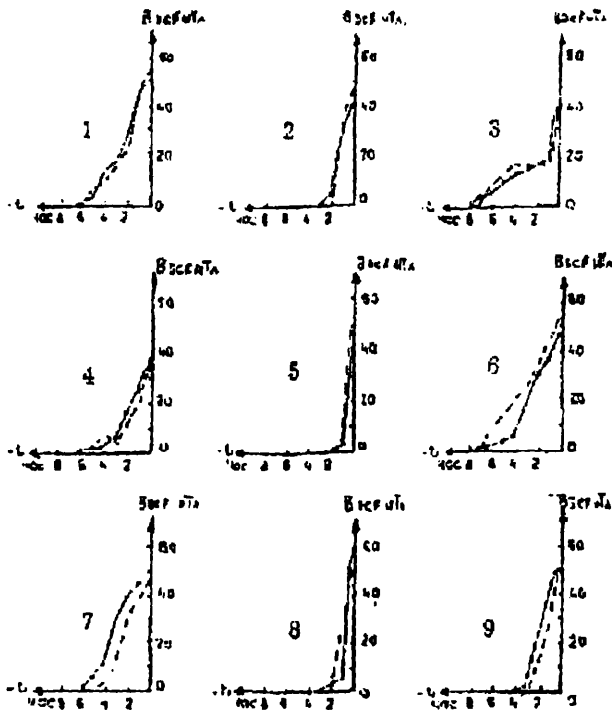


Рис. 5 Сопоставление наблюдаемых (сплошные кривые) и моделированных значений (пунктирные кривые) начальной фазы, для ряда случаев, классических геомагнитных бурь.

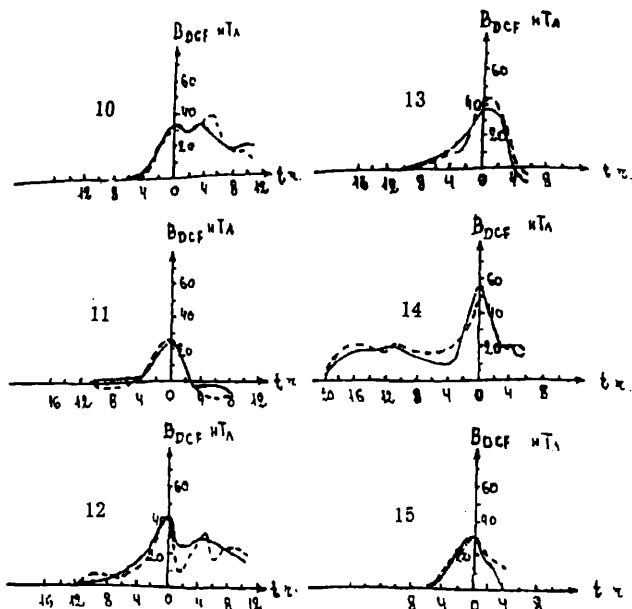


Рис. 6. Сопоставление наблюдаемых (сплошные кривые) и моделированных значений (пунктирные кривые) начальной фазы, для ряда случаев, геомагнитных возмущений типа  $S_i$  (малые бури, содержащие только начальную фазу, без развития главной фазы).

Таблица 1.

N	Момент максимума DCF				Классификация бурь	DCF- возмущения		
	год	месяц	день	час		$\Delta D_{st}$	$V_{DCF,1}$	$V_{DCF,2}$
1	1968	5	7	5	умеренная	51	93	55
2	1971	1	18	10	малая	37	48	37
3	1972	3	6	22	умеренная	44	74	50
4	1974	10	24	1	- « -	44	65	54
5	1977	11	25	16	- « -	39	63	46
6	1978	12	14	4	- « -	46	41	42
7	1979	4	25	1	большая	58	59	51
8	1982	3	1	13	оч. Большая	50	69	45
9	1983	11	28	14	малая	51	75	50
10	1973	1	3	24	$S_i$	33	36	30
11	1973	2	5	4	- « -	24	27	23
12	1974	12	16	24	- « -	44	40	39
13	1976	6	3	23	- « -	38	41	42
14	1979	7	3	9	- « -	58	37	42
15	1981	7	11	7	- « -	28	39	28

Из анализа таблицы 1 и рис. 5 и 6 следует, что:

а) вычисленные по формуле автора амплитуды начальной фазы геомагнитных бурь гораздо ближе к экспериментально наблюдаемым значениям, чем это получается при определении по формуле Мида;

б) вычисленные по формуле (5) значения DCF-поля на поверхности Земли достаточно хорошо описывают динамику развития начальной фазы геомагнитных бурь. Следовательно, предложенную формулу (5) можно считать вполне приемлемой при модельных представлениях DCF-поля на поверхности Земли в период начальной фазы геомагнитных бурь, по среднечасовым параметрам межпланетной среды.

### Общие выводы

1. DCF-возмущения нельзя объяснить только усилением динамического давления солнечного ветра на магнитосферу Земли.

2. Эффект DCF-тока на поверхности Земли, кроме динамического давления солнечного ветра, зависит и от азимутальной компоненты электрического поля в солнечном ветре.

3. Построена эмпирическая формула (5), связывающая поля DCF-токов на поверхности Земли в период начальной фазы геомагнитных бурь с динамическим давлением солнечного ветра и с азимутальной компонентой электрического поля в солнечном ветре.

4. Вычисленные формулой (5) значения DCF-поля на поверхности Земли достаточно хорошо описывают динамику развития начальной фазы геомагнитных бурь. Следовательно, предложенную формулу можно считать вполне приемлемой при модельных представлениях DCF-поля на поверхности Земли в период начальной фазы геомагнитных бурь, по среднечасовым параметрам межпланетной среды.

5. Существующие в настоящее время теоретические модели, объясняющие начальную фазу геомагнитной бури (модификации теории Чепмена-Ферраро и Мида) не полностью отражают физическую природу DCF-возмущений, так как они разработаны в предположении, что DCF-возмущения являются следствием лишь увеличения динамического давления солнечного ветра на магнитосферу Земли. Для полного объяснения физической природы начальной фазы геомагнитной бури в основу теории, кроме динамического давления солнечного ветра, следует внести и магнитное давление, и рассмотреть взаимодействие гидромагнитного потока плазмы с магнитосферой Земли.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Chapman S., Ferraro V. C. Terr. magnet. and atmos. electr. Vol. 37, p. 147, 1932.
2. Mead G. D., J. Geophys. Res. Vol 69, N7, p. 1181, 1964.
3. Чхетия А. М. Исследования по геомагнетизму аэронавигации и физике Солнца. Вып. 74. Изд. Наука. Москва. с. 3. 1985.
4. Чхетия А. М. Исследования по геомагнетизму аэронавигации и физике Солнца. Вып. 81. Изд. Наука. Москва. с. 67. 1988.
5. Чхетия А. М. Магнитосферные исследования. №12. Москва. с. 26. 1969.
6. Чхетия А. М. Геомагнетизм и аэронавигация Том 26. №12. Изд. „Наука“. Академия наук СССР, Москва. с. 835. 1988.
7. Чхетия А. М. Результаты исследования основных геофизических явлений комплексной проблемы Солнечно-земных связей. Изд. GCI. Тбилиси, 1998, 257 с.
8. Кузнецова Т. Е., Шевнин А. Д. Геомагнитные вариации и электрическое поле. Москва. Наука, с. 35, 1984.
9. King J. H. Interplanetary medium data book. Appendix. September 1977. Supplement 1. December 1979. Supplement 2. January 1983. Supplement 3A. 1977-1985. April 1986.
10. Sugiura M. Poros D. J. Hourly values of equatorial  $D_{st}$  for the years 1963 to 1985. CSFC 1987.
11. ჩხეთია ა. დედამიწის ცელადი მაგნიტური ველის ელექტრომაგნიტური და ბიოსფერული ეფექტების შესახებ. საქართველოს რესპუბლიკის მამუელთა კორპუსი, საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიის მ. ნოღაის სახ. გეოფიზიკის ინსტიტუტი. ქ. თბილისი. გვ. 18. 1994.



# მზის ქარის პლაზმის პარამეტრების როლი გეომაგნიტური ქარიშხლის დასაწყისი ფაზის ფორმირებაში

ა. ჩხეგია

რეზიუმე

გეომაგნიტური ქარიშხლის დასაწყისი ფაზის (DCF-აღრევების) პერიოდში, საპლანეტათაშორისო სივრცისა და გეომაგნიტური აქტივობის D – ინდექსის ერთობლივი ანალიზის შედეგად დადგინდა იქნა, რომ:

- 1) DCF – აღრევები არ შეიძლება აიხსნას ლედამიწის მაგნიტოსფეროზე მხოლოდ მზის ქარის დინამიური წნევის გაზრდით. ამდენად, არსებული თეორიული მოდელები (ს. ჩეპმენ – ვ. ფერეროსა და ჯ. მილასი) არასრულყოფილად აღწერენ გეომაგნიტური ქარიშხლის დასაწყისი ფაზის ფიზიკურ ბუნებას.
- 2) ლედამიწაზე დანაკვირვები DCF – ველის მომატებული მნიშვნელობა, გარდა მზის ქარის დინამიური წნევისა, დამოკიდებულია მზის ქარში ელექტრული ველის ამიბუტალურ მდგენელზე.
- 3) მიღებულია ფორმულა, რომელიც გეომაგნიტური ქარიშხლის დასაწყისი ფაზის პერიოდში ლედამიწაზე დანაკვირვები DCF – ველის მომატებულ მნიშვნელობას აკავშირებს მზის ქარის დინამიურ წნევასთან და მზის ქარის ელექტრული ველის ამიბუტალურ მდგენელთან.
- 4) მიღებული ფორმულით გათვლილი DCF – ველი საკმაოდ კარგად აღწერს გეომაგნიტური ქარიშხლის დასაწყისი ფაზის განვითარების დინამიკის სურათს.

## The Role of Solar Wind Plasma Parameters in Formation of the Initial Phase of the Geomagnetic Storms

A. Chkhetia

Abstract

Combined analysis of Dst – index of interplanetary medium and geomagnetic activity at the initial phase of geomagnetic storm (DCF disturbance) made us to conclude the following:

- 1) DCF disturbances can't be explained as solely due to an increased dynamic pressure of solar wind on the Earth's magnetosphere. Therefore, existing theoretical models (Chapman-Ferraro and G. Mead) don't reflect comprehensively the physical nature of geomagnetic storm's initial phase.
- 2) Increased value of DCF- field, observed on the Earth's surface, depends not only the solar wind dynamic pressure, but also on the azimuthally component of electric field in solar wind.
- 3) Received formula connects observed DCF- field's increased value during the initial phase of geomagnetic storm with dynamic pressure of solar wind and the azimuthally component of solar wind electric field.
- 4) Calculated by the received formula DCF-field describes quit well dynamics of development of initial phase of the geomagnetic storm.

