

УДК 550.385.4

ВЗАИМОСВЯЗЬ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПЕРИОДЫ ГЛАВНЫХ ФАЗ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ, СВЯЗАННЫХ С B_Z -КОМПОНЕНТОЙ ММП, ПО ДАННЫМ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА

© 2011 г. И. В. Ковалевский

Учреждение РАН Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова,
г.Троицк (Московская обл.)
e-mail: jkoval@izmiran.ru

Поступила в редакцию 25.01.2010 г.
После доработки 29.09.2010 г.

Исследованы основные причины главных фаз геомагнитосферных бурь ($D_{st}^{\min} = -(37-226)$ нТл.) с использованием кластерного анализа в виде метода “ближайшего соседа”. На основе двумерной (по B_Z -компоненте ММП и D_{st} -индексу) масштабной кластерной классификации главных фаз бурь выделены слабые, умеренные, сильные и очень сильные бури (выборки), связанные с B_Z -компонентой ММП. Корреляционная кластеризация 32-х взаимосвязанных физических процессов, характеризующих каждую главную фазу, позволила установить наличие общей части внутренней структуры взаимосвязанных физических процессов для всех выборок. В свою очередь, каждая выборка обладает собственной внутренней структурой. Исследуемые выборки главных фаз бурь характеризуются различным физическим развитием, зависящим от масштаба события. Наличие общей части свидетельствует о том, что магнитосферная активность в период главной фазы бурь всех масштабов D_{st} -индекса определяется преимущественно B_Z и B_Y -компонентами ММП и связанными на их основе функциями, а также полной величиной B ММП. Установлено, что наиболее тесные связи присущи $D_{st}(V^2B_S)$ и $D_{st}(VB_S)$, где B_S – южная компонента ММП, V – скорость солнечного ветра. Суббуревая активность (AE), порождаемая V^2B_S и VB_S , играет существенную роль только в периоды главных фаз слабых и умеренных бурь, тогда как группировка по скорости V проявляет существенную активность только в период очень сильных магнитных бурь. Роль параметра Акасофу ϵ оказалась менее выраженной. Показано, что, в первом приближении, функции связи V^2B_S и VB_S предпочтительны для прогнозирования D_{st} – индекса и функции инжекции Q в период главных фаз геомагнитосферных бурь.

1. ВВЕДЕНИЕ

Ключевой частью геомагнитосферной бури является геомагнитная буря, представляемая D_{st} -индексом. Ее самая важная характеристика – это главная фаза, характеризующаяся резким понижением D_{st} -индекса [Gonzalez et al., 1994]. На этом интервале времени происходят наиболее интенсивные физические процессы. Однако до настоящего времени вопрос о причинах генерации и развития бурь различных интенсивностей остается до конца не решенным [Gonzalez et al., 1994; Kamide et al., 1998]. Так, в работе [Kamide et al., 1998] утверждается, что D_{st} -индекс можно прогнозировать непосредственно по данным измерений солнечного ветра и межпланетного магнитного поля. Это утверждение противоречит традиционной точке зрения, что суббури (AE - или AL -индексы) играют существенную роль в развитии D_{st} -вариации в период главной фазы бурь [Gonzalez et al., 1994]. На основе статистического анализа и метода наложенных эпох высказано мнение, что для бурь различной интенсивности суще-

ствует подмножество различных межпланетных причин [Gosling et al., 1991; Taylor et al., 1994; Yokoyama and Kamide, 1997]. Результаты метода наложенных эпох свидетельствуют также о том, что южная компонента ММП B_S играет решающую роль как в возникновении начала генерации главной фазы бури, так и в определении ее интенсивности [Yokoyama and Kamide, 1997; Loewe and Prolss, 1997].

Это особенно четко проявляется в периоды сильных бурь (например, [Tsurutani et al., 1992]). Более того, в работе [Gonzalez et al., 1994] приведены пороговые значения B_S -компоненты и необходимая ее длительность для реализации бурь различной интенсивности. Пока отсутствует единая точка зрения на возможную взаимосвязь D_{st} -вариации с B_S или B_Z -компонентами ММП [Siscoe, 1982; Иванова и Клейменова, 1994; Порчхидзе и др., 1976].

Однако существует и иной подход к решению обсуждаемой задачи, согласно которому предложены различные функции связи для воспроизведения D_{st} -

вариации (см. например, [Burton et al., 1975; Perrault and Akasofu, 1978; Murayama, 1982; Пудовкин и др., 1985; Gonzalez et al., 1989; Feldstein, 1992; Gonzalez et al., 1994; Wu and Lundstedt, 1997; Maltsev and Rezhenov, 2003]). В частности, в большинстве предлагаемых функций связи ключевую роль приписывают B_Z или B_S -компонентам ММП. Исключение составляет ε – функция связи Акасофу [Perrault and Akasofu, 1978], в которой ключевая роль принадлежит полной величине B ММП.

Таким образом, в настоящее время нет единого мнения о том, какая из предлагаемых функций связи или какой из параметров ММП являются наиболее геоэффективными и каков вклад AL - или AE -индексов в объяснение D_{st} -вариации.

Для исследования физических процессов, связанных с геомагнитосферными бурями, особенно в периоды их главных фаз, в работе использован кластерный анализ, реализованный в виде метода “ближайшего соседа” [Ковалевский и Морозов, 1989]. При этом выполнена масштабная кластерная классификация главных фаз бурь по двум опорным физическим процессам (B_Z -компоненте ММП и D_{st} -индексу) с целью выделения событий, одинаковых по масштабу и форме и связанных с изменением B_S -компоненты. Выделены слабые, умеренные, сильные и очень сильные бури (выборки).

2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В таблице 1 приведен список исследованных главных фаз 31-ой геомагнитосферной бури вместе с необходимыми для анализа параметрами [King, 1979]. По представленным в таблице данным выполнена интерполяционная нормировка: часовые усредненные данные о 13-ти исходных процессах интерполируются по методу кубических полиномов Лагранжа и приводятся к единичному временному интервалу дискретным представлением в 16-ти точках этого интервала. Таким образом, все главные фазы бурь сопоставляются на основе не физического временного представления, как в обычном кросс-корреляционном анализе, а характерного времени, за которое приняты времена понижения D_{st} -индекса от конца начальной фазы до абсолютного минимума в каждой из реализаций бури.

Далее, по нормированным исходным данным вычисляются дополнительные “производные” параметры. В результате получается, что каждая главная фаза бури характеризуется $M = 32$ временными процессами. Между этими “внутренними” процессами может быть оценена мера их коррелированности.

Итак, для характеристики индивидуальных особенностей главной фазы бури использован набор из

$M = 32$ параметров (элементарных процессов), из которых 13 являются исходными (измеряемыми) [King, 1979] и 19 – “производными” процессами [Burton et al, 1975; Perrault and Akasofu, 1978; Murayama, 1982; Пудовкин и др., 1985; Gonzalez et al., 1989; Feldstein, 1992; Gonzalez et al., 1994; Wu and Lundstedt, 1997]. К исходным данным относятся: V , n и T (скорость, концентрация и температура протонной компоненты солнечного ветра), полная величина B и компоненты B_X , B_Y и B_Z ММП, углы ориентации Φ_B , θ_B ММП, дисперсия $\sigma_Z B_Z$ -компоненты, D_{st} -, AE - и AL -индексы геомагнитной активности. В качестве “производных” процессов приняты: V^2 , $P = nV^2$, nV^3 , $B_T^2 = B_Y^2 + B_Z^2$, $E_Z = VB_Y$, $E_T = VB_T$, $E_{\sigma z} = V(\sigma_Z - B_Z)$, $E_S = VB_S$, $V^2 B_S$, $F_M = VB_S(m_p n V^2)^{1/3}$, $\varepsilon = VB^2 \sin^4(\theta/2) l_0^2$, $\varepsilon_{CF} = VB^2 \sin^4(\theta/2) l_{CF}^2$, $F_p = B^2 |\sin^3(\theta/2)| / n^{1/2}$, $FEM = dDR/dt + DR/\tau_R$, $U_T = -4 \times 10^{20} (dDR/dt + DR/\tau_R) + 3AE10^{15}$ (эрг/с), $DCF = 0.02 Vn^{1/2}$, где $B_S = B_Z$ при $B_Z < 0$ и $B_S = 0$ при $B_Z \geq 0$, m_p – масса протона, $\theta = \arctg(|B_Y/B_Z|)$ при $B_Z \geq 0$ и $\theta = 180^\circ - \arctg(|B_Y/B_Z|)$ при $B_Z < 0$, $l_0 = 7R_E$ (радиусов Земли), $l_{CF} = (M_D^2 / 4\pi m_p n V^2)^{1/6}$, $M_D = 8.6 \times 10^{25}$ Гс см³, τ_R – постоянная распада кольцевого тока, $FEM = FEM2$ при $\tau_R = 2$ ч и $FEM = FEM6$ при $\tau_R = 6$ ч. Эти 32 элементарных процесса достаточно полно описывают состояние главной фазы бури как сложного системного явления, комплекса или объекта. Таким образом, в результате первичной обработки получается набор данных для $N = 31$ исследуемых событий, состоящий из $M = 32$ временных процессов (исходных и производных параметров) в интервалах (t_1^i, t_2^i) , где $i = 1, \dots, N$.

3. МЕТОД ОБРАБОТКИ

3.1. Двумерная масштабная классификация главной фазы бурь по особенностям B_Z -компоненты ММП и D_{st} -индекса

При анализе данных о сложном физическом явлении одним из важнейших этапов обработки информации является классификация явлений. В нашем случае при рассмотрении совокупности главных фаз магнитных бурь ставится задача масштабной классификации по двум опорным процессам (B_Z -компоненте ММП и D_{st} -индексу). Эта операция необходима для выделения выборок (кластеров и изолятов), одинаковых по форме и по масштабу и связанных с особенностями изменения B_Z -компоненты. В последующем это позволит исследовать присущую им внутреннюю структуру взаимосвязанных физических процессов и выделить наиболее геоэффективные процессы, определяющие раз-

Таблица 1. Список исследуемых главных фаз геомагнитосферных бурь. Минимальные и средние значения и стандартные отклонения $D_{st}(D_{st}^{\min}, \bar{D}_{st}, \sigma(D_{st}))$, и $B_Z(B_Z^{\min}, \bar{B}_Z, \sigma(B_Z))$

№	Момент D_{st}^{\min}		D_{st}^{\min} нТл	\bar{D}_{st} нТл	$\sigma(D_{st})$ нТл	B_Z^{\min} нТл	\bar{B}_Z нТл	$\sigma(B_Z)$ нТл
	ч	дата						
1	06	14.01.1967	-160	-91	54	-24.5	-15.3	5.4
2	14	16.02.1967	-130	-63	53	-22.0	-10.3	6.8
3	11	02.01.1968	-108	-73	29	-14.1	-11.4	4.3
4	11	11.02.1968	-124	-73	32	-12.3	-8.4	4.3
5	01	28.02.1968	-37	-20	12	-8.5	-7.5	1.1
6	22	05.04.1968	-112	-41	38	-19.3	-12.7	4.2
7	20	11.02.1969	-136	-96	29	-10.9	-8.7	1.9
8	02	16.05.1972	-79	-35	33	-15.9	-2.0	7.9
9	23	21.02.1973	-121	-77	34	-9.6	-8.1	1.4
10	23	02.04.1973	-211	-143	52	-21.2	-18.6	3.0
11	09	14.04.1973	-134	-88	36	-13.5	-10.8	3.0
12	22	25.01.1974	-66	-39	16	-6.6	-2.5	2.2
13	21	16.03.1974	-87	-49	36	-13.2	-5.9	8.2
14	07	06.07.1974	-204	-98	69	-20.3	-14.6	4.8
15	23	02.08.1974	-61	-33	22	-8.9	-4.6	3.6
16	23	08.11.1074	-67	-23	30	-9.1	-4.5	3.0
17	22	20.04.1975	-70	-35	25	-10.8	-5.0	6.1
18	04	26.05.1975	-37	-22	15	-8.1	-6.2	1.3
19	10	28.08.1978	-226	-151	60	-22.8	-17.9	3.7
20	11	29.09.1978	-224	-140	59	-24.4	-14.6	8.6
21	02	08.11.1978	-47	-18	54	-10.9	-9.1	2.6
22	13	12.11.1978	-93	-42	34	-12.6	0.2	8.8
23	19	25.11.1078	-149	-98	35	-15.3	-11.8	4.7
24	21	07.01.1979	-100	-49	27	-10.9	-7.5	2.0
25	09	21.02.1979	-95	-42	31	-10.3	-7.0	3.1
26	24	10.03.1979	-121	-65	43	-14.0	-9.9	3.6
27	17	22.03.1979	-81	-23	34	-16.1	-3.0	9.3
28	04	04.04.1979	-202	-119	57	-16.9	-12.0	3.1
29	04	22.04.1979	-99	-36	37	-10.6	-6.2	3.1
30	15	25.04.1979	-149	-91	46	-16.1	-6.5	7.4
31	19	30.08.1979	-140	-83	38	-11.3	-7.5	4.2

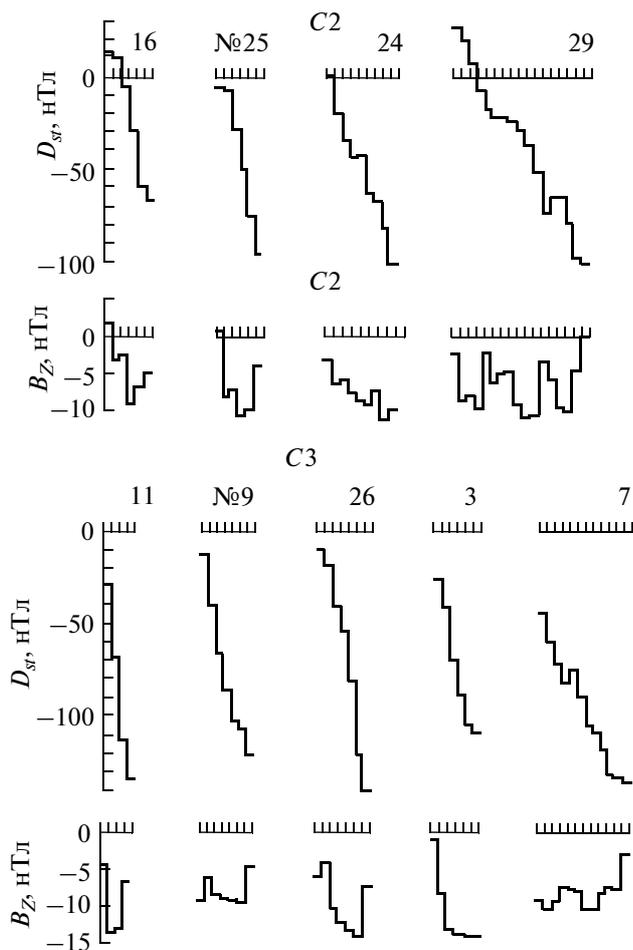


Рис. 2. Примеры графиков D_{st} -индексов и B_Z -компоненты ММП в периоды главных фаз геомагнитосферных бурь для кластеров, полученных на основе двумерной $D_{st} - B_Z$ масштабной классификации с использованием масштабного расстояния $d_{fg}^{(2)}$.

держаний $(N - 1) = 30$ расстояний. Полученный дендрит для $N = 31$ и результат его достаточно подробной кластеризации до шага $S_k = 17$ приведен на рис. 1. В результате выполненной кластеризации $D_{st} - B_Z$ -дендрита совокупности 31-ой главных фаз выделены три кластера (C1, C2 и C3) и три изолята (I3) — назовем их выборками.

Сходство и различие масштабных параметров главных фаз кластеров и изолятов, т.е. выборок, можно видеть на рис. 2 и в табл. 2, где приведены пиковые значения опорных процессов (D_{st}^{\min} и B_Z^{\min}) соответствующих событий, их средние значения за период события (\bar{D}_{st} и \bar{B}_Z), а также их среднеквадратические отклонения ($\sigma(D_{st})$ и $\sigma(B_Z)$). Кроме того, в таблице приведены данные двух потенциально важ-

ных процессов: VB_S^{\min} , \overline{VB}_S ; AE^{\max} и \overline{AE} , а также значения соответствующих процессов, усредненных по всем событиям выборок. Некоторые из них оказались следующими: для C1 $\bar{D}_{st}^{\min} = -46$ нТл, $\bar{B}_Z^{\min} = -8.8$ нТл; для C2 $\bar{D}_{st}^{\min} = -90$ нТл, $\bar{B}_Z^{\min} = -10.2$ нТл, для C3 $\bar{D}_{st}^{\min} = -130$ нТл, $\bar{B}_Z^{\min} = -12.8$ нТл, для I3 $\bar{D}_{st}^{\min} = -220$ нТл, $\bar{B}_Z^{\min} = -22.8$ нТл. С учетом полученных значений \bar{D}_{st}^{\min} и в соответствии с терминологией авторов работ [Sugiura and Chapman, 1960; Gonzalez et al., 1994] фактически выделены слабые (C1), умеренные (C2), сильные (C3) и очень сильные бури (I3).

Следовательно, масштабная классификация главных фаз бурь одновременно по двум основаниям (B_Z -компоненты и D_{st} -вариации) позволяет достаточно хорошо классифицировать бури по форме и масштабным характеристикам и тем самым подтвердить важную роль B_Z -компоненты ММП как причинного процесса в генерации D_{st} -вариации.

3.2. Корреляционная кластеризация физических процессов

Следующим этапом обработки данных является проверка физической обоснованности полученных классификаций главных фаз бурь, т.е. проведение содержательного физического анализа, сводящегося к выявлению структур взаимосвязанных физических процессов, присущих полученным выборкам главных фаз бурь. Он состоит в кластерном анализе взаимосвязанности исходных и производных процессов, характеризующих каждую главную фазу. Для решения этой цели используется мера “коррелированности процессов”, опирающаяся на расстояние

$$d_{fg}^C = (1 - r_{fg}^2)^{1/2}; \quad (r_{fg} = \pm 1 \rightarrow d_{fg}^C = 0). \quad (4)$$

Устанавливаются связи между собой для всех $M = 32$ временных процессов. Из полученной матрицы с $M(M - 1)/2 = 496$ расстояниями между процессами выделяется дендрит процессов с $(M - 1)$ связями, который затем анализируется вышеуказанным способом, а именно, с выделением относительно независимых процессов (изолятов) и выборок (кластеров) тесно коррелированных процессов [Ковалевский и Морозов, 1989].

На рис. 3а приведен дендрит главной фазы бури с № 25 таблицы, а на рис. 3б — результат анализа подобных дендритов в форме дендрограмм коррелированности процессов из кластера C2 умеренной бури двумерной масштабной $D_{st} - B_Z$ классификации. Дробление дендрита (кластеризация) осуществля-

Таблица 2. Минимальные и средние значения D_{st} , B_Z , VB_S и максимальные и средние значения параметров AE и стандартные отклонения D_{st} и B для главных фаз кластеров (C1, C2, C3) и изолятов (I3)

№	D_{st}^{min} нТл	\bar{D}_{st} нТл	$\sigma(D_{st})$ нТл	B_Z^{min} нТл	\bar{B}_Z нТл	$\sigma(B_Z)$ нТл	VB_S^{min} мВ/м	\bar{VB}_S мВ/м	AE^{max} нТл	\bar{AE} нТл
C1										
5	-37	-20	12	-8.5	-7.5	1.1	-2.8	-2.4	636	402
18	-37	-22	15	-8.1	-6.2	1.3	-3.5	-2.8	879	620
21	-47	-18	24	-10.9	-9.1	2.6	-4.3	-3.2	737	335
15	-61	-33	22	-7.7	-4.6	3.6	-3.9	-2.3	848	662
Среднее	-46	-23	18	-8.8	-6.9	2.2	-3.6	-2.7	775	505
C2										
24	-100	-49	27	-10.9	-7.5	2.2	-5.8	-4.0	1358	699
25	-95	-42	31	-10.3	-7.0	3.1	-5.4	-3.6	1037	735
29	-99	-36	37	-10.6	-6.2	3.1	-4.6	-2.4	795	559
16	-67	-23	30	-9.1	-4.5	3.0	-5.0	-2.4	698	526
Среднее	-90	-38	31	-10.2	-6.3	2.8	-5.2	-3.1	972	630
C3										
7	-136	-96	29	-10.9	-8.7	1.9	-5.3	-4.3	1363	778
9	-121	-77	34	-9.6	-8.1	1.4	-5.4	-4.4	909	581
11	-134	-88	36	-13.5	-10.8	3.0	-7.0	-5.4	839	646
3	-108	-73	29	-14.1	-11.4	4.3	-6.6	-5.0	729	540
26	-140	-65	43	-14.1	-9.9	3.6	-6.4	-4.5	1049	701
23	-149	-98	35	-15.3	-11.8	4.7	-8.1	-5.7	1021	703
4	-124	-73	31	-11.9	-8.4	4.3	-5.8	-3.9	1005	536
Среднее	-130	-81	34	-12.8	-9.9	3.3	-6.4	-4.7	988	641
I2										
19	-226	-151	60	-22.8	-17.9	3.7	-11.3	-8.5	1026	827
10	-211	-143	52	-21.2	-18.6	3.0	-9.6	-8.4	960	565
20	-224	-140	59	-24.4	-14.6	8.6	-20.7	-12.8	1080	808
Среднее	-220	-145	57	-22.8	-17.0	5.1	-13.9	-9.9	1022	733

лась до шага $SN = S3$, после которого выполнялось условие $|r_{fg}| \geq 0.8$ (дендрограмма на рис. 3б) для последующих взаимосвязей между парными процессами f и g . В настоящей работе в дальнейшем кластеризация дендритов осуществлялась до шага, после которого выполнялось условие $|r_{fg}| \geq 0.7$. Указанное условие позволяет выявить надежные внутренние структуры взаимосвязанных физических процессов и наиболее геоэффективные процессы, контролирующие развитие $[D_{st}]$ и (AE) процессов. Что касается дендрограммы главной фазы бури с № 25, то отметим следующее: наличие тесной связи между группировками $[D_{st}]$ и (AE) , активность которых определяется группировками $[B_Z]$, $[B_T]$, (B_Y) , (V) и процес-

сами B_X , σ_Z и ϕ_B . Изолированность (ε) -группировки свидетельствует о сравнительно слабом ее влиянии на $[D_{st}]$ и (AE) .

Анализ дендрограмм внутренних структур процессов главных фаз бурь полученных кластеров и изолятов (выборки) показал, что физические процессы обладают существенной избыточностью, а именно, часть из них всегда составляла тесно связанные устойчивые группировки (как правило, с $|r_{fg}| \geq 0.9$ между соседними процессами). Для таких группировок введем следующие условные обозначения, используя при этом самые характерные их компоненты:

$$[D_{st}] = D_{st} + DR + U_T + FEM2 + FEM6; (AE) = AE + AL; (DCF) = DCF + n + nV^2 + nV^3; (V) = V + V^2;$$

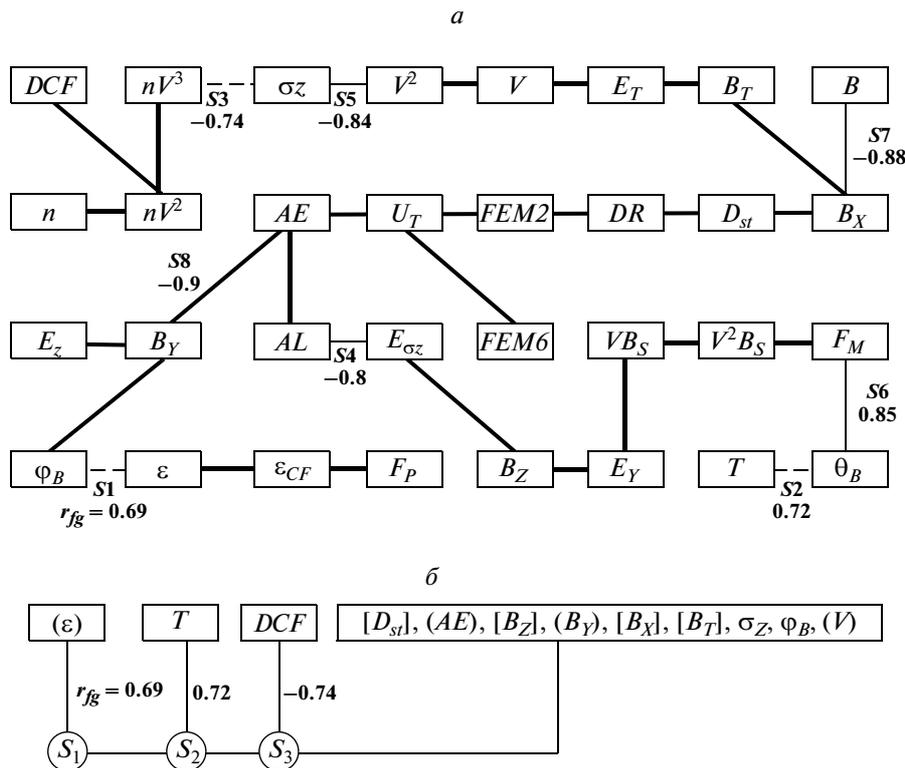


Рис. 3. Дендрит (а) и “неизбыточный” вариант дендрограммы (б) коррелированности процессов для главной фазы бури с № 25 (кластер С2). “Неизбыточный” вариант дендрограммы есть результат кластеризации дендрита до шага $SN = S3$, после которого коэффициент корреляции между соседними процессами был $|r_{fg}| \geq 0.8$. Обозначения на рис. 3а: жирные линии – очень тесные связи ($|r_{fg}| \geq 0.9$), тонкие линии – тесные связи ($0.8 \leq |r_{fg}| \leq 0.9$), штриховые линии – умеренные связи ($0.7 \leq |r_{fg}| \leq 0.8$).

$[B_Z] = B_Z + E_Y + E_{\sigma_z} + \theta_B + VB_S + V^2B_S + F_M$; $(B_T) = B_T + VB_T$; $[B_T] = B + B_T + VB_T$; $(B_Y) = B_Y + VB_Y$, $(\epsilon) = \epsilon + \epsilon_{CF} + F_P$. Отметим, что группировка $[D_{st}]$ характеризует активность магнитосферных процессов, тогда как группировка (AE) – геомагнитную активность авроральных электроструй. Остальные группировки в преобладающем большинстве характеризуют активность межпланетной среды.

Анализ дендритов коррелированности процессов полученных выборок при кластеризации дендритов проводился до уровня $|r_{fg}| \geq 0.7$ между соседними процессами оставшихся структур. Установлено, что существует общая часть (CP) внутренней структуры взаимосвязанных физических процессов для всех выборок. В свою очередь, каждая выборка обладает собственной общей внутренней структурой:

$$\begin{aligned}
 CP &= [D_{st}] + B + [B_Z] + (B_Y); \\
 C1 &= CP + (B_X) + (\epsilon) + (DCF) + (AE); \\
 C2 &= CP + (B_T) + B_X + \sigma_z + \varphi_B + (V) + T + (AE); \\
 C3 &= CP + (B_T) + (\epsilon) + (V) + T + (AE);
 \end{aligned}$$

$$I3 = CP + (B_T) + B_X + (\epsilon) + (DCF) + (V) + T.$$

Предположим, что полученные внутренние структуры взаимосвязанных физических процессов в какой-то степени отражают происходящие физические процессы, связанные с главной фазой бури. Тогда можно сделать вывод, что главная фаза исследуемых выборок характеризуется различным физическим развитием с одновременным участием нескольких физических процессов, зависящих от масштаба события (т.е. D_{st} -индекса). Наличие CP свидетельствует о том, что магнитосферная активность в период главной фазы $[D_{st}] = D_{st} + DR + Q + U_T$ (где $Q = dDR/dt + DR/6$) всех масштабов D_{st} определяется преимущественно $[B_Z]$ и (B_Y) группировками, а также полной величиной B межпланетного магнитного поля. Отметим также, что с увеличением интенсивности $|D_{st}^{min}|$ возрастает роль (B_T) и (V) группировок и температуры T . Тогда как при этом роль суббуревой активности (AE) ослабевает. Она существенна в периоды слабых и умеренных бурь, хотя определенную роль играет и в периоды

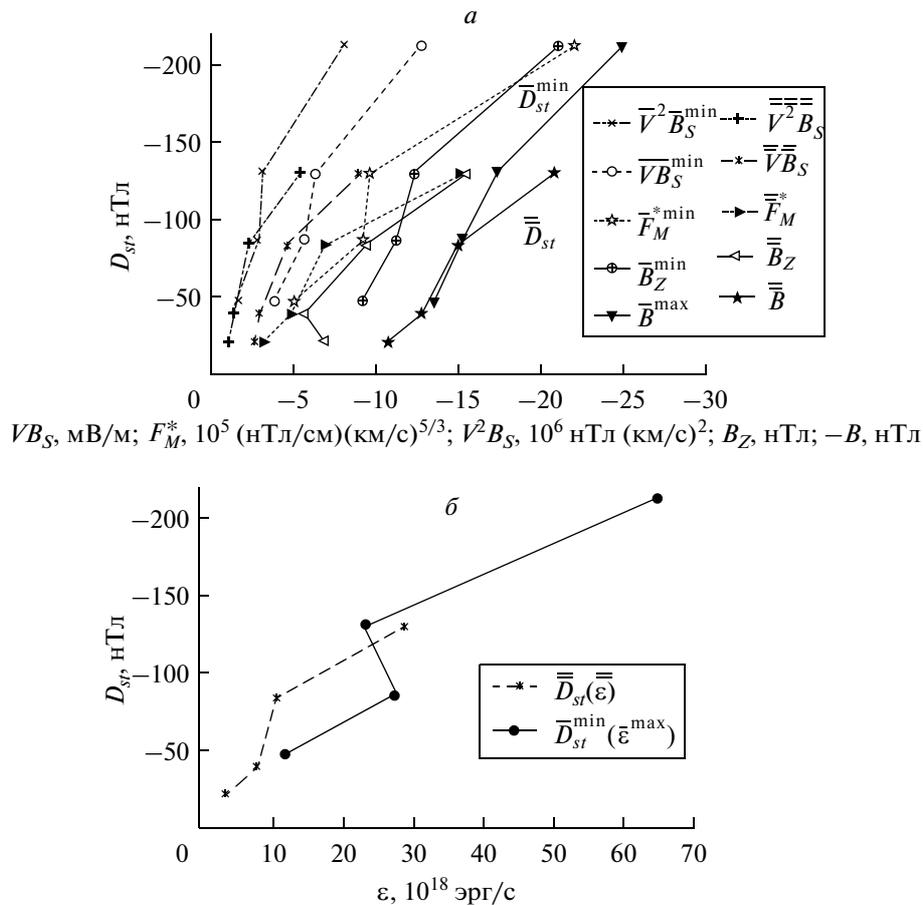


Рис. 4. Зависимость D_{st} -индекса от различных процессов X (средних и экстремальных значений за период главной фазы бури, усредненных по всем событиям соответствующих выборок: $\overline{D_{st}}(\overline{X})$, $\overline{D_{st}}^{\min}(\overline{X}^{\text{ext}})$): а) B , нТл; B_Z , нТл; VB_S , мВ/м; $V^2 B_S$, 10^6 нТл(км/с) 2 ; F_M^* , 10^5 (нТл/см)(км/с) $^{5/3}$; б) ϵ , 10^{18} эрг/с.

интенсивных бурь. Роль (ϵ) группировки и B_{χ} -компоненты ММП неоднозначна. Хотя в некоторых случаях она существенна. Полученные структуры взаимосвязанных физических процессов отражают взаимодействие межпланетной среды с магнитосферой.

Полученное в работе сходство внутренних структур взаимосвязанных физических процессов среди главных фаз одной и той же выборки и различие между внутренними структурами из разных выборок позволяет утверждать, что масштабная $D_{st}-B_Z$ классификация имеет достаточную степень физической достоверности.

С учетом отдельных и общих внутренних структур взаимосвязанных физических процессов полученных выборок главных фаз бурь можно сделать вывод о многовариантном физическом развитии исследуемых событий. Этот процесс можно достаточ-

но достоверно описать только с помощью многопараметрической функции связи. В этом состоит отличие полученного результата от выводов работ [Burton et al., 1975; Perrault and Akasofu, 1978; Akasofu, 1981; Murayaraa, 1982; Пудовкин и др., 1985; Feldstein, 1992; Gonzalez et al., 1994; Иванова и Клейменова, 1994; Yokoyama and Kamide, 1997; Wu and Lundstedt, 1997; Kamide et al., 1998; Maltsev and Rezhnev, 2003].

Однако возникает необходимость выяснить, какие из причинных процессов многопараметрической функции оказываются наиболее эффективными в развитии главной фазы бури. По ним можно было бы в грубом приближении судить о физике явления и моделировать его, и следовательно, прогнозировать некоторые типы главных фаз, т.е. развитие D_{st} -вариации или функции инъекции Q в период главной фазы. В настоящей работе ограничимся

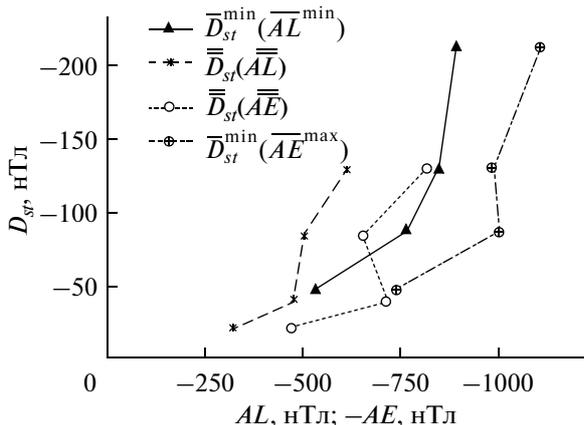


Рис. 5. Связь между D_{st} -индексом и AE - или AL -индексами (средних и экстремальных значений, усредненных по всем событиям соответствующих выборок) в период главных фаз: $\bar{D}_{st}(AE)$ – штриховая линия; $\bar{D}_{st}^{\min}(AE^{\max})$ – штрихпунктирная линия; $\bar{D}_{st}(AL)$ – разреженная штриховая линия; $\bar{D}_{st}^{\min}(AL^{\min})$ – жирная линия.

рассмотрением характера воздействия на $Y = D_{st}$ -индекс (или Q) таких причинных “геоэффективных” процессов как X (B , B_Z , VB_S , V^2B_S , $F^* = VB_S(nV^2)^{1/3}$, функции связи Акасофу ε , а также AE - и AL -индексов). Причинно следственные связи строились на основе средних (\bar{Y} , \bar{X}) и экстремальных (Y^{ext} , X^{ext}) значений соответствующих процессов за период главной фазы, усредненных по всем событиям каждой выборки, а именно, $\bar{Y}(\bar{X})$ и $\bar{Y}^{\text{ext}}(\bar{X}^{\text{ext}})$.

На рис. 4а показана зависимость D_{st} -индекса от B , B_Z , VB_S , V^2B_S и F_M^* . Видно, что по форме кривые зависимостей $D_{st}(VB_S)$, $D_{st}(V^2B_S)$ и $D_{st}(F_M^*)$ подобны друг другу. Тогда как кривые зависимостей $D_{st}(B_Z)$ и $D_{st}(B)$ существенно отличаются от них. Видно также, что кривые зависимостей $\bar{D}_{st}(\bar{V}^2\bar{B}_S)$, $\bar{D}_{st}(\bar{V}\bar{B}_S)$, $\bar{D}_{st}(\bar{F}_M^*)$, $\bar{D}_{st}^{\min}(\bar{V}\bar{B}_S^{\min})$, $\bar{D}_{st}^{\min}(\bar{V}^2\bar{B}_S^{\min})$, и $\bar{D}_{st}^{\min}(\bar{F}_M^{*\min})$ практически описываются линейным законом в период слабых, умеренных и сильных бурь (т.е. при $\bar{D}_{st}^{\min} > -130$ нТл, $\bar{D}_{st} > -81$ нТл). Эта линейность нарушается, а эффективность связей ослабляется при очень сильных бурях (т.е. при $\bar{D}_{st}^{\min} < -130$ нТл): наклон кривых увеличивается, особенно для зависимостей $\bar{D}_{st}(\bar{F}_M^*)$ и $\bar{D}_{st}^{\min}(\bar{F}_M^{*\min})$, т.е. эффективность связи ослабляется. Отметим, что зависимость $\bar{D}_{st}(\bar{B}_Z)$ линейна только в пределах умеренных, силь-

ных и очень сильных бурь ($\bar{D}_{st} = -(38-145)$ нТл).

Зависимость $\bar{D}_{st}^{\min}(\bar{B}_Z^{\min})$ описывается параболической кривой с горизонтальной осью во всем исследуемом диапазоне с ослаблением тесноты связи при увеличении возмущенности $|\bar{D}_{st}^{\min}|$. Что касается влияния полной величины B ММП на D_{st} – вариацию, то зависимость $\bar{D}_{st}(\bar{B})$ приблизительно линейна во всем исследуемом диапазоне. Тогда как зависимость $\bar{D}_{st}^{\min}(\bar{B}^{\max})$ несколько усложняется. С учетом наклона полученных кривых можно сделать вывод, что наиболее тесная связь имеет место в зависимостях $D_{st}(V^2B_S)$ и $D_{st}(VB_S)$.

Анализ данных рис. 4б и 6б показал, что влияние параметра Акасофу ε на развитие возмущенности главной фазы бури оказалось менее заметным. Детальный анализ зависимости функции инжекции Q от перечисленных выше процессов X выходит за рамки данной статьи. Отметим только, что характер графиков $Q(X)$ практически мало отличается от зависимости $D_{st}(X)$, но усиливается линейность связей $\bar{Q}(\bar{B}_Z)$ и $\bar{Q}(\bar{B})$.

Эффект воздействия суббурь на бури можно проследить на рис. 5, где приведены зависимости $D_{st}(AL)$ и $D_{st}(AE)$ в диапазоне $\bar{D}_{st}^{\min} = -(46-220)$ нТл. Видно, что умеренная пропорциональная связь существует между AL - или AE -индексами и D_{st} -индексом только для главных фаз слабых и умеренных бурь ($\bar{D}_{st}^{\min} > -90$ нТл). С увеличением возмущенности ($\bar{D}_{st} < -38$ нТл, $\bar{D}_{st}^{\min} < -90$ нТл) $|D_{st}|$ – индекс резко увеличивается при насыщении суббуревой активности на уровне $\bar{AL}^{\min} = -801$ нТл и $\bar{AE} = -457$ нТл ($\bar{AE}^{\max} = 972$ нТл и $\bar{AE} = 630$ нТл). При этом связи $D_{st}(AL)$ и $D_{st}(AE)$ приблизительно описываются параболической кривой с вертикальной осью. Более близкая парабола описывает связи $\bar{D}_{st}^{\min}(\bar{AL}^{\min})$ и $\bar{D}_{st}^{\min}(\bar{AE}^{\max})$. Отметим, что зависимости $Q(AL)$ и $Q(AE)$ не приведенные в работе, по своему характеру мало отличаются от кривых $D_{st}(AL)$ и $D_{st}(AE)$, т.е. для них также характерна связь параболического типа.

Представляет интерес реакция суббуревой активности (а именно, AL -индекса) в период главной фазы бури на перечисленные выше функции связи и процессы, показанная на рис. 6а и б. Видно, что реакция AL -индексов существенно отличается от реакции D_{st} -индексов на одни и те же функции X (B , B_Z , VB_S , V^2B_S , F_M и ε).

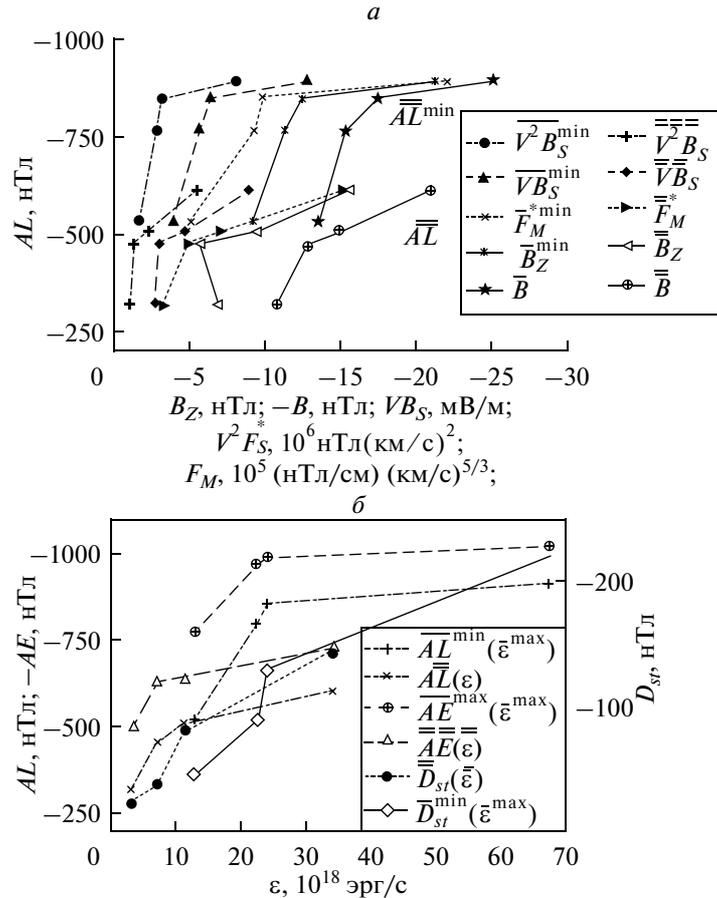


Рис. 6. Зависимости AL – индексов от причинных процессов X (построенных на основе средних и экстремальных значений за период главных фаз, усредненных по всем событиям соответствующих выборок: $\overline{AL}(\overline{X})$, $\overline{AL}^{\min}(\overline{X}^{ext})$): (а) – B_Z – сплошная линия; B – сплошная линия; VB_S – штриховая линия; V^2B_S – штрихпунктирная линия; F_M^* – пунктирная линия; (б) ε – штрихпунктирная линия. Для сравнения приводятся $\overline{AE}(\overline{\varepsilon})$, $\overline{AE}^{\max}(\overline{\varepsilon}^{\max})$ и $\overline{D}_{st}(\overline{\varepsilon})$, $\overline{D}_{st}^{\min}(\overline{\varepsilon}^{\max})$.

Остановимся на некоторых особенностях кривых $AL(X)$. Так, кривые $\overline{AL}^{\min}(\overline{X}^{ext})$ и $\overline{AL}(\overline{X})$ подобны друг другу по форме, за исключением кривой $\overline{AL}(\overline{B}_Z)$. Все кривые обладают более сложной структурой по сравнению с зависимостями $D_{st}(X)$.

В периоды слабой и умеренной возмущенности главной фазы бури ($\overline{D}_{st}^{\min} > -90$ нТл и $\overline{D}_{st} > -38$ нТл; или $\overline{AL}^{\min} > -800$ нТл и $\overline{AL} > -460$ нТл) существует зависимость \overline{AL} от (\overline{X}). При этом наиболее тесная связь имеет место в зависимостях $\overline{AL}(\overline{V^2B}_S)$, $\overline{AL}(\overline{VB}_S)$ за исключением $\overline{AL}(\overline{B}_Z)$. Связи ослабевают для зависимостей $\overline{AL}(\overline{F}_M^*)$, $\overline{AL}(\overline{B})$ и $\overline{AL}(\overline{\varepsilon})$. При усилении возмущенности ($\overline{D}_{st}^{\min} < -90$ нТл и $\overline{AL}^{\min} < -800$ нТл)

резко ослабевает связь \overline{AL} с \overline{X} , т.е. имеет место насыщение электроструи при $\overline{B}_Z^{\min} = -10$ нТл и (\overline{B}_Z) = -6 нТл; $\overline{VB}_S^{\min} = -5$ мВ/м и $\overline{VB}_S = -3$ мВ/м; $\overline{V^2B}_S^{\min} = -2.6 \times 10^6$ км² нТл/с² и $\overline{V^2B}_S = -1.5$ км² нТл/с²; $\overline{\varepsilon}^{\max} = 2 \times 10^{19}$ эрг/с, $\overline{\varepsilon} = 7 \times 10^{17}$ эрг/с. При этом $|D_{st}|$ -индекс резко увеличивается, что, по-видимому, свидетельствует о нарушении связи между кольцевым током и авроральными процессами в период главных фаз сильных и очень сильных бурь. Для связей $\overline{AL}^{\min}(\overline{X}^{ext})$ насыщение электроструи наступает только после сильной бури, и имеет место практически линейная зависимость \overline{AL}^{\min} от \overline{B}_Z^{\min} , и \overline{VB}_S^{\min} в периоды главных фаз слабых, умеренных и сильных бурь.

Анализ кривых $AE(X)$ показал, что они подобны кривым $AL(X)$ с незначительным изменением уровня насыщения AE -индекса.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Сравним полученные нами результаты на основе кластерного анализа с некоторыми результатами других исследователей с использованием метода наложенных эпох, кросскорреляционного анализа и искусственных нейронных сетей.

Полученные нами результаты подтверждают точку зрения о том, что совокупность межпланетных причин, порождающих главную фазу бурь, различна для бурь в зависимости от уровней их интенсивности [Gosling et al., 1991]. Южная компонента B_S ММП [Yokoyama and Kamide, 1997] наряду с функциями связи, включающими в себя B_Z или B_S -компоненты ММП [Wu and Lundstedt, 1997], играют решающую роль в определении масштаба главной фазы магнитных бурь. Параметр Акасофу ϵ слабо геоэффективен в воздействии на бурю [Wu and Lundstedt, 1997b; Maltsev and Rezhnev, 2003]. В работе [Wu and Lundstedt, 1997a] с использованием искусственных нейронных сетей показано, что степень тесноты взаимосвязи D_{st} -индекса с функциями $p^{1/3}VB_S \equiv F_M$, $p^{1/2}VB_S$, V^2B_S , VB_S , VB_Z и V^3B_S последовательно убывает соответственно от высокой до низкой. В отличие от этого результата в исследуемой нами совокупности событий получен несколько иной порядок степени тесноты взаимосвязи D_{st} -индекса с V^2B_S , VB_S , $p^{1/3}VB_S$ она убывает соответственно от сильной до умеренной.

В работах [Tsurutani and Gonzalez, 1995; Maltsev and Rezhnev, 2003] утверждается, что B_Y -компонента ММП оказывает слабое влияние на геомагнитную активность. Вместе с тем в настоящей работе показано, что B_Y -компонента ММП играет существенную роль в развитии главной фазы бури.

До сих пор в литературе существует неоднозначный ответ на вопрос о степени воздействия суббурь на бури: от отрицания такого воздействия [Iemogu and Rao, 1996] до его наличия [Akasofu, 1981; Gonzalez et al., 1994; Yokoyama and Kamide, 1997], вплоть до существования связи в широком диапазоне в форме алгоритма [Cade et al., 1995; Shen and Liu, 2002]. Однако наши результаты свидетельствуют о том, что связь суббуря – буря существует преимущественно в периоды слабых и умеренных бурь.

В работе подтвержден факт отличия реакции AE -или AL -индексов от реакции D_{st} -индекса на одни и те же функции связи [Gonzalez et al., 1989], факт тесной связи V^2B_S с AL -индексом [Murayama, 1982] (в нашем случае только в период слабых и умеренных бурь), а также факт насыщения AE - или AL -индек-

сов при определенных пороговых значениях B_Z -компоненты ММП и некоторых функций связи [Weimer et al., 1990].

Из полученных в настоящей работе результатов следует, что для прогнозирования D_{st} -индекса или функции инъекции Q во время главной фазы бури во всем диапазоне исследуемых бурь (с учетом степени взаимосвязей $D_{st}(X)$) в первом приближении целесообразно использовать функции связи V^2B_S и VB_S . Функции связи $F_M^* = VB_S(nV^2)^{1/3}$ и процесс B_Z -компоненты также пригодны для прогнозирования D_{st} и Q во время главной фазы бури. Использование параметра Акасофу ϵ для этих целей вызывает определенные сомнения, несмотря на его популярность. Отметим, что AL - и AE -индексы могут оказаться потенциально полезными для прогнозирования D_{st} и Q , но только в периоды слабой и умеренной магнитной возмущенности ($\bar{D}_{st}^{\min} = -(46-90)$ нТл, $A\bar{L}^{\min} = -(526-801)$ нТл).

Добавим, что AL - (или AE)-индекс представляется возможным довольно надежно прогнозировать с помощью функций V^2B_S и VB_S , но только во время главной фазы бури при слабой и умеренной возмущенности. Эффективность прогнозирования суббуревой активности в указанном диапазоне возмущенности при использовании B_Z -компоненты, F_M^* и параметра ϵ существенно понижается. Заметим, что прогнозирование AL - и AE -индексов в периоды сильных возмущений $\bar{D}_{st}^{\min} < -130$ нТл, $A\bar{L}^{\min} < -860$ нТл) с использованием указанных выше функций связи представляется крайне затруднительным в свете тенденции насыщения суббуревой электроструктуры в указанном диапазоне активности.

5. ВЫВОДЫ

1. Исследованы основные причины развития главных фаз геомагнитосферных бурь ($\bar{D}_{st}^{\min} = -(37-226)$ нТл) с применением кластерного анализа в виде метода “ближайшего соседа”.

2. На основе D_{st} - B_Z масштабной классификации по среднему уровню \bar{D}_{st} и \bar{B}_Z и их среднеквадратическому отклонению от этого уровня на интервале главных фаз бури выделены выборки слабых, умеренных, сильных и очень сильных бурь, связанных с B_Z -компонентой ММП, внутренние структуры взаимосвязанных физических процессов которых зависят от масштаба события (D_{st}^{\min} -индекса). Корреляционная кластеризация позволила установить, что магнитосферная активность в периоды главных фаз всех исследуемых масштабов D_{st} -индекса определя-

ется преимущественно B_Z и B_Y -компонентами ММП и связанными на их основе некоторыми функциями связи, а также полной величиной B ММП. Наиболее тесные взаимосвязи имеют место в зависимостях $D_{st}(V^2B_S)$ и $D_{st}(VB_S)$, где B_S — южная компонента ММП, V — скорость солнечного ветра. Взаимосвязь параметра Акасофу ϵ с D_{st} -индексом оказалась относительно слабой.

3. Суббуревая активность (AL - или AE -индексы), порождаемая преимущественно V^2B_S или VB_S , вносит существенный вклад в D_{st} -индекс только в периоды главных фаз слабых и умеренных бурь.

4. По-видимому, функции связи V^2B_S и VB_S являются более геоэффективными для прогнозирования D_{st} -индекса и функции инжекции Q в периоды исследуемых главных фаз бурь, а также для прогнозирования AL - или AE -индексов, но только в периоды слабых и умеренных бурь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Иванова П.К., Клейменова Н.Г.* Максимальное значение D_{st} в главную фазу больших магнитных бурь и параметры ММП // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 34. № 4. С. 67–72. 1994.
- *Ковалевский И.В., Морозов Ю.И.* Методы распознавания образов в анализе сложных физических явлений. М.: ИЗМИРАН, 259 с. 1989.
- *Порчхеидзе Ц.Д., Чхетия А.М., Фельдштейн Я.И.* Межпланетная плазма и геомагнитные бури в течение солнечного цикла // Симп. КАПГ по солнечно-земной физике (Тбилиси, сентябрь 1976). Тез. докл. Ч.3. М.: Наука, С. 142. 1976.
- *Пудовкин М.И., Зайцева С.А., Сизова Л.З., Орлова Н.М.* Вариации поля D_{st} в зависимости от параметров солнечного ветра // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 25. № 5. С. 812–817. 1985.
- *Akasofu S.-I.* Relationships between the AE and D_{st} indices during geomagnetic storms // J. Geophys. Res. V. 86. № A6. P. 4820–4822. 1981.
- *Burton R.K., McPherron L., Russell T.* An empirical relationship between interplanetary conditions and D_{st} // J. Geophys. Res. V. 80. № 31. P. 4204–4214. 1975.
- *Cade W.B., Sojka J.J., Zhu L.* A correlative comparison of the ring current and auroral electrojets using geomagnetic indices // J. Geophys. Res. V. 100. № A1. P. 97–105. 1995.
- *Feldstein Y.I.* Modeling of the magnetic field of magnetospheric ring current as a function of interplanetary parameters // Space Sci. Rev. V. 59. № 1 + 2. P. 83–165. 1992.
- *Gonzalez W.D., Tsurutani B.T., Gonzalez A.L.C., Smith E.J., Tang F., Akasofu S.-I.* Solar wind – magnetosphere coupling during intense magnetic storms (1978–1979) // J. Geophys. Res. V. 94. № A7. P. 8835–8851. 1989.
- *Gonzalez W.D., Joselyn J.A., Kamide Y., Kroehl H.W., Rostoker G., Tsurutani B.T., Vasyliunas V.M.* What is a geomagnetic storm? // J. Geophys. Res. V. 99. № A4. P. 5771–5792. 1994.
- *Gosling J.T., McComas D.J., Phillips T.L., Bame S.J.* Geomagnetic activity associated with Earth passage of interplanetary shock disturbances and coronal mass ejections // J. Geophys. Res. V. 96. № A5. P. 7831–7839. 1991.
- *Iyemori T., Rao D.R.K.* Decay of the D_{st} field of geomagnetic disturbance after substorm onset and its implication to storm-substorm relation // Ann. Geophysical V. 14. № 6. P. 608–618. 1996.
- *Kamide Y., Baumjohann W., Daglis I.A. et al.* Present understanding of magnetic storms: storm-substorm relationship // J. Geophys. Res. V. 103. № A8. P. 17705–17728. 1998.
- *King J.H.* Composite interplanetary magnetic field and plasma tape // SM-41B. NSSDC/WDC-A. Greenbelt. 1987.
- *Loewe C.A., Prolss G.W.* Classification and mean behavior of magnetic storms // J. Geophys. Res. V. 102. № A7. P. 14209–14213. 1997.
- *Maltsev Yu.P., Rezhnev B.V.* Relation of D_{st} index to solar wind parameters // Int. J. Geomag. Aeron. V. 4. № 1. P. 1–9. 2003.
- *Murayama T.* Coupling function between solar wind parameters and geomagnetic indices // Rev. Geophys. Space Phys. V. 20. № 3. P. 623–629. 1982.
- *Perreault P., Akasofu S.-I.* A study of geomagnetic storms // Geophys. J. R. Astron. Soc. V. 54. № 3. P. 547–573. 1978.
- *Shen C., Liu Z.* A physics-based study of the D_{st} - AL relationship // J. Geophys. Res. V. 107. № A1. doi:10.1029/2001JA900121. 2002.
- *Siscoe G.L.* Energy coupling between region 1 and 2 Birkeland current system // J. Geophys. Res. V. 87. № A7. P. 5124–5130. 1982.
- *Taylor J.R., Lester M., Yeoman T.K.* A superposed epoch analysis of geomagnetic storms // Ann. Geophysicae V. 2. № 7. P. 612–624. 1994.
- *Tsurutani B.T., Gonzalez W.D., Tang F., Tehee Y.* Great magnetic storms // Geophys. Res. Lett. V. 19. № 1. P. 73–76. 1992.
- *Tsurutani B.T., Gonzalez W.D.* The future of geomagnetic storm prediction: implications from recent solar and interplanetary observations // J. Atmos. Terr. Phys. V. 75. V. 12. P. 1369–1384. 1995.
- *Weimer D.R., Reinleitner L.A., Kan J.R., Zhu L., Akasofu S.-I.* Saturation of the auroral electrojet current and the polar cap potential // J. Geophys. Res. V. 95. № 11. P. 18981–18987. 1990.
- *Wu J.-G., Lundstedt H.* Geomagnetic storm predictions from solar wind data with the use of dynamic neural networks // J. Geophys. Res. V. 102. № A7. P. 14255–14268. 1997(a).
- *Wu J.-G., Lundstedt H.* Neural network modeling of solar wind – magnetosphere interaction // J. Geophys. Res. V. 102. № A7. P. 14457–14466. 1997(b).
- *Yokoyama N., Kamide Y.* Statistical nature of geomagnetic storms // J. Geophys. Res. V. 102. № A7. P. 14215–14222. 1997.