

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  $\epsilon$  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, характеризуемая 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  $\varepsilon$  – 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  $\Phi_B$ ,  $\theta_B$  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 см<sup>3</sup>,  $\tau_R$  – 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  $i = 1, \dots, N$ .

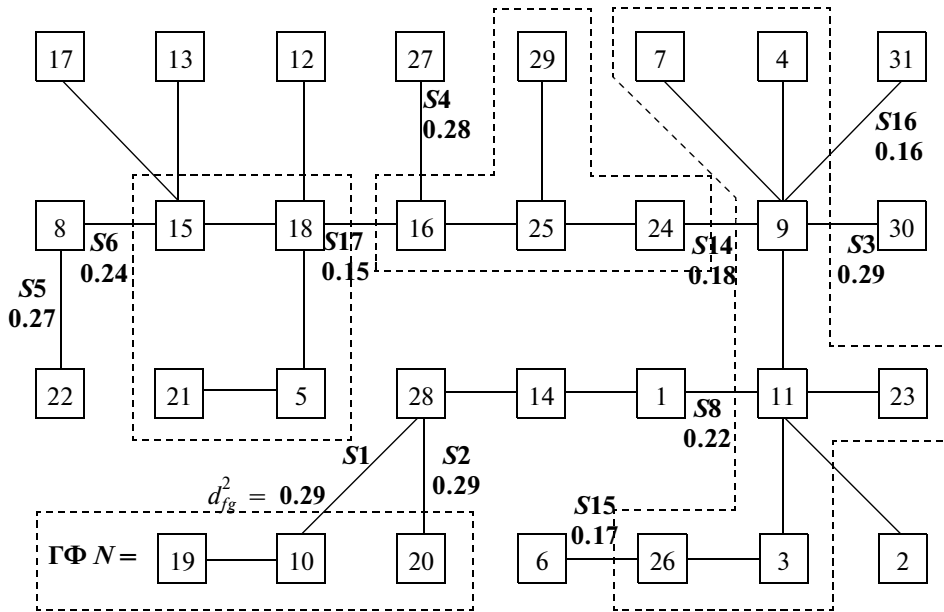
## 3. МЕТОД ОБРАБОТКИ

### 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. 1.**  $D_{st}$ - $B_Z$  дендрит совокупности 31-ой главной фазы геомагнитосферных бурь, рассчитанный на основ двумерного масштабного расстояния  $d_{fg}^{(2)} = \sqrt{0.5(d_{fg}^{D_{st}})^2 + 0.5(d_{fg}^{B_Z})^2}$  с использованием одномерного масштабного расстояния  $d_{fg}^M$ ; кластеризация включительно до шага  $S_{17}$ .

витие главной фазы. При этом учитываются различия по среднему уровню значений  $D_{st}$ -вариации и  $B_Z$ -компоненты, а также по среднеквадратическому отклонению  $\sigma(D_{st})$  и  $\sigma(B_Z)$  от этого уровня на интервале главной фазы.

Для осуществления  $D_{st}$ - $B_Z$  масштабной кластерной классификации введем комплексное двумерное расстояние  $d_{fg}^{(2)}$  (как частный случай общей формулы для многомерного расстояния  $d_{fg}^{(n)}$  [Ковалевский и Морозов, 1989]):

$$d_{fg}^{(2)} = [0.5(d_{fg}^{D_{st}})^2 + 0.5(d_{fg}^{B_Z})^2]^{1/2}, \quad (1)$$

основанное на соответствующих одномерных масштабных расстояниях  $d_{fg}^{D_{st}}$  и  $d_{fg}^{B_Z}$ , рассчитанных по:

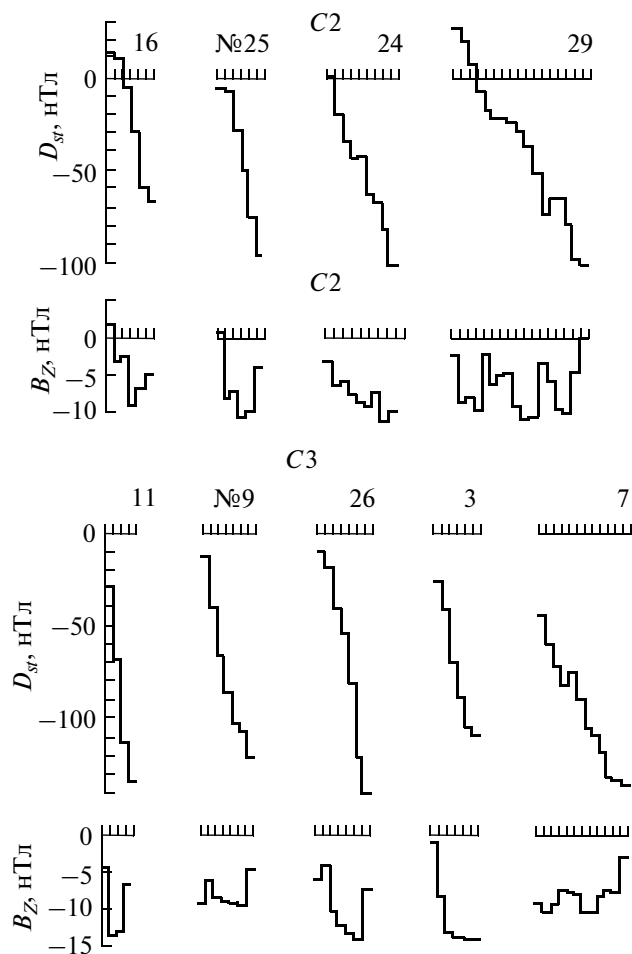
$$\begin{aligned} (d_{fg}^M)^2 &= \frac{1}{4} \int_0^1 [f(t) - g(t)]^2 dt = \\ &= \frac{1}{4} [(\bar{f} - \bar{g})^2 + (\sigma_f - \sigma_g)^2 + 2\sigma_f\sigma_g(1 - r_{fg})], \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} \bar{f} &= \int_0^1 f(t) dt; & \bar{g} &= \int_0^1 g(t) dt; \\ \sigma_f^2 &= \int_0^1 [f(t)]^2 dt - (\bar{f})^2; & \sigma_g^2 &= \int_0^1 [g(t)]^2 dt - (\bar{g})^2; \\ r_{fg} &= \left[ \int_0^1 f(t)g(t) dt - (\bar{f}\bar{g}) \right] / \sigma_f\sigma_g, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $f(t), g(t)$  – векторные реализации одного и того же процесса;  $\bar{f}$  и  $\bar{g}$  – средние уровни процесса;  $\sigma_f, \sigma_g$  – средние разбросы  $f$  и  $g$  относительно  $\bar{f}$  и  $\bar{g}$  в анализируемом временном интервале;  $r_{fg}$  – коэффициент корреляции по Пирсону между  $f(t)$  и  $g(t)$  на исследуемом интервале, т.е. на временном интервале главной фазы бури.

Далее, на основе разработанного компьютерного алгоритма обработки эмпирической информации о многопараметрических физических объектах, в данном случае набора 31-ой главных фаз бурь (см. табл. 1), вычисляется матрица с  $N(N-1)/2 = 465$  расстояниями  $d_{fg}^{(2)}$  между событиями  $f, g$ . Затем с помощью кластерного анализа (“метод ближайшего соседа”) из этой матрицы выделяется дендрит, со-



**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)

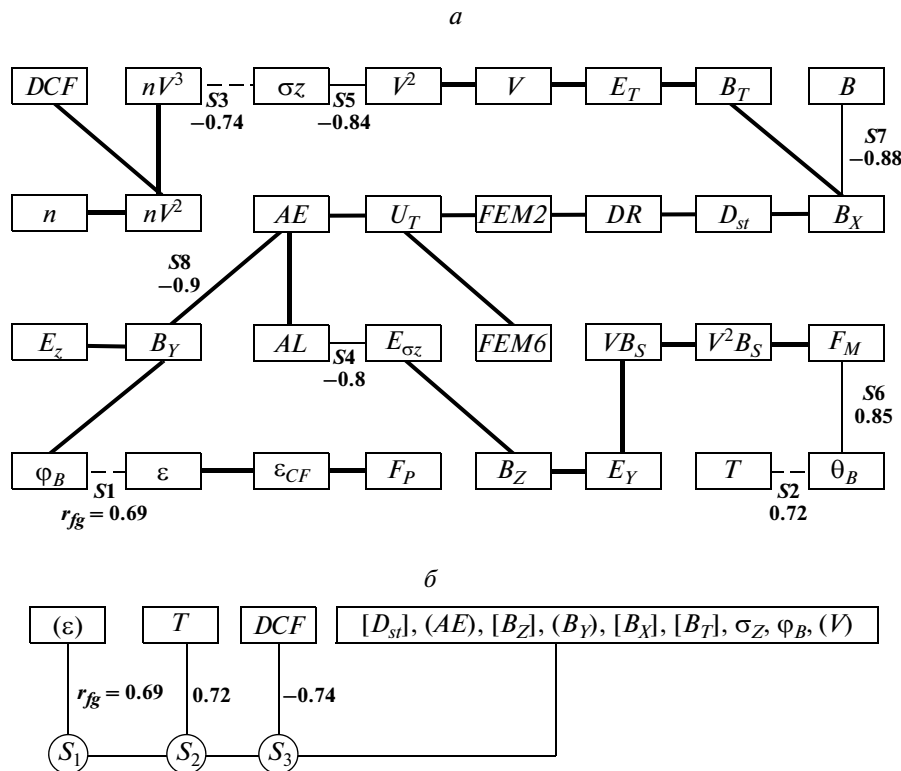
№	$D_{st}^{min}$ нТл	$\bar{D}_{st}$ нТл	$\sigma(D_{st})$ нТл	$B_Z^{min}$ нТл	$\bar{B}_Z$ нТл	$\sigma(B_Z)$ нТл	$VB_S^{min}$ мВ/м	$\bar{VB}_S$ мВ/м	$AE^{max}$ нТл	$\bar{AE}$ нТл
<b>C1</b>										
5	-37	-20	12	-8.5	-7.5	1.1	-2.8	-2.4	636	402
18	-37	-22	15	-8.1	-6.2	1.3	-3.5	-2.8	879	620
21	-47	-18	24	-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
<b>C2</b>										
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
<b>C3</b>										
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
<b>I2</b>										
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  $B_X$ ,  $\sigma_Z$  и  $\phi_B$ . Изолированность  $(\varepsilon)$ -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 ( $0.7 \leq |r_{fg}| \leq 0.8$ ).

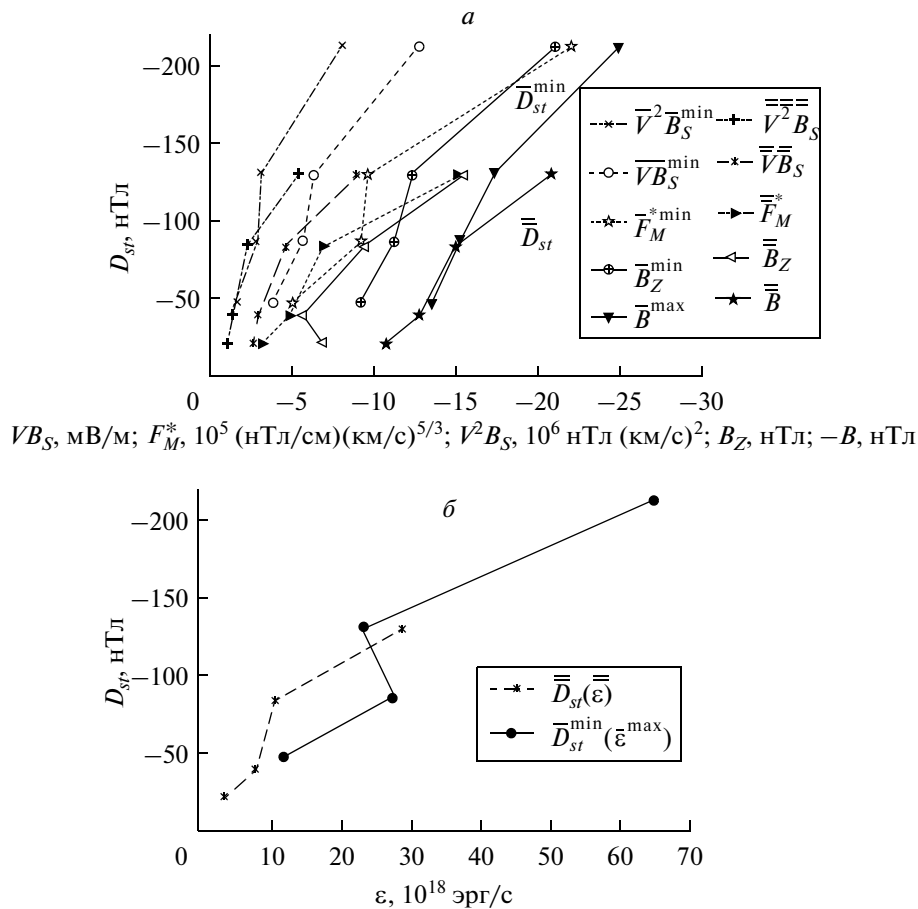
$[B_Z] = B_Z + E_Y + E_{\sigma_z} + \theta_B + VB_S + V^2B_S + F_M$ ;  $(B_T) = B_T + VB_T$ ;  $[B_T] = B + B_T + VB_T$ ;  $(B_Y) = B_Y + VB_Y$ ,  $(\varepsilon) = \varepsilon + \varepsilon_{CF} + F_P$ . Отметим, что группировка  $[D_{st}]$  характеризует активность магнитосферных процессов, тогда как 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:

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

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

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)  $\epsilon$ ,  $10^{18}$  эрг/с.

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

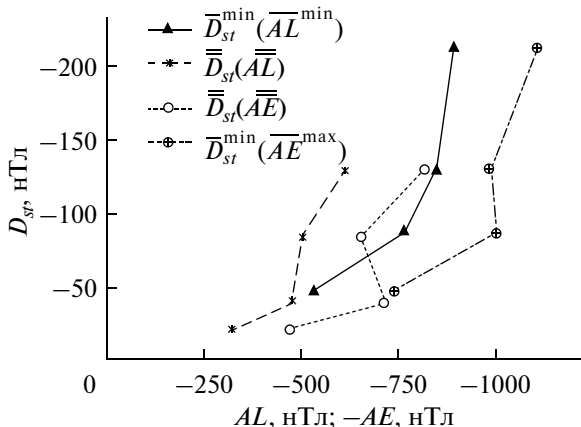
Полученное в работе сходство внутренних структур взаимосвязанных физических процессов среди главных фаз одной и той же выборки и различие между внутренними структурами из разных выборок позволяет утверждать, что масштабная  $D_{st}-B_Z$  классификация имеет достаточную степень физической достоверности.

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  $\varepsilon$ , а также  $AE$ - и  $AL$ -индексов). Причинно следственные связи строились на основе средних ( $\bar{Y}$ ,  $\bar{X}$ ) и экстремальных ( $Y^{\text{ext}}$ ,  $X^{\text{ext}}$ ) значений соответствующих процессов за период главной фазы, усредненных по всем событиям каждой выборки, а именно,  $\bar{Y}(\bar{X})$  и  $\bar{Y}^{\text{ext}}(\bar{X}^{\text{ext}})$ .

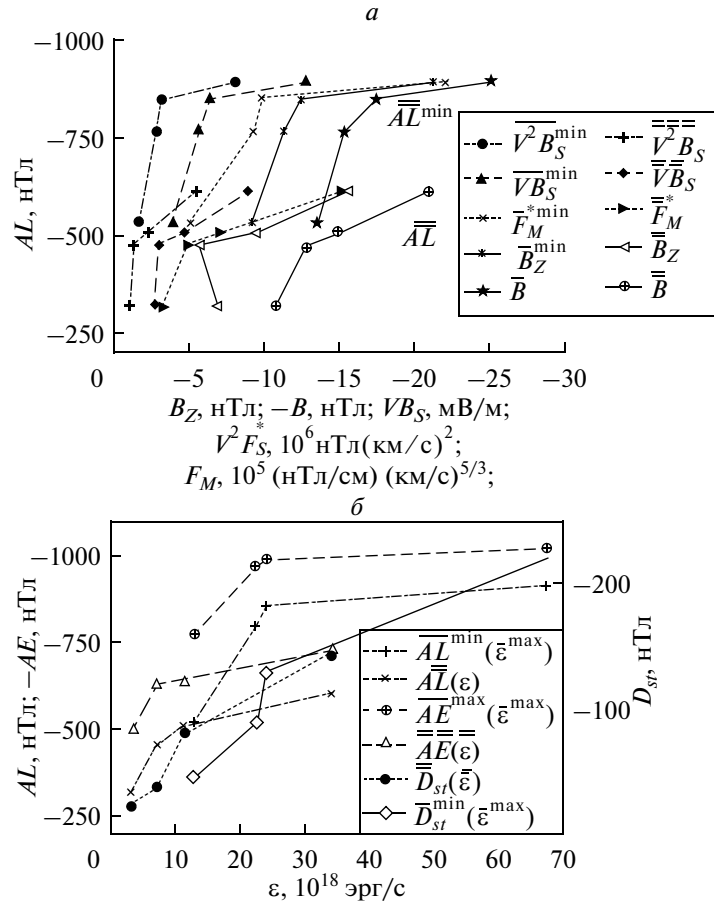
На рис. 4а показана зависимость  $D_{st}$ -индекса от  $B$ ,  $B_Z$ ,  $VB_S$ ,  $V^2B_S$  и  $F_M^*$ . Видно, что по форме кривые зависимостей  $D_{st}(VB_S)$ ,  $D_{st}(V^2B_S)$  и  $D_{st}(F_M^*)$  подобны друг другу. Тогда как кривые зависимостей  $D_{st}(B_Z)$  и  $D_{st}(B)$  существенно отличаются 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  $\varepsilon$  на развитие возмущенности главной фазы бури оказалось менее заметным. Детальный анализ зависимости функции инъекции  $Q$  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  $\varepsilon$ ).



**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)  $\epsilon$  – штрихпунктирная линия. Для сравнения приводятся  $\overline{AE}(\overline{\epsilon})$ ,  $\overline{AE}^{\max}(\overline{\epsilon}^{\max})$  и  $\overline{D}_{st}(\overline{\epsilon})$ ,  $\overline{D}_{st}^{\min}(\overline{\epsilon}^{\max})$ .

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  $\overline{AL}(\overline{\epsilon})$ . 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;  $\overline{V^2B}_S^{\min} = -2.6 \times 10^6$  км<sup>2</sup> нТл/с<sup>2</sup> и  $\overline{V^2B}_S = -1.5$  км<sup>2</sup> нТл/с<sup>2</sup>;  $\overline{\epsilon}^{\max} = 2 \times 10^{19}$  эрг/с,  $\overline{\epsilon} = 7 \times 10^{17}$  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  $\epsilon$  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  $\epsilon$  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  $\epsilon$  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  $\epsilon$  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.