

УДК 523.62-726

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВРЕМЕННОГО ХОДА КОРРЕКТИРОВАННОГО $D_{st}^*$ ИНДЕКСА НА ГЛАВНОЙ ФАЗЕ МАГНИТНЫХ БУРЬ, ГЕНЕРИРОВАННЫХ РАЗНЫМИ ТИПАМИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

© 2015 г. Н. С. Николаева, Ю. И. Ермолаев, И. Г. Лодкина

Институт космических исследований РАН, г. Москва

nnikolae@iki.rssi.ru

Поступила в редакцию 08.05.2014 г.

В работе выполнено моделирование корреktированного (с учетом токов магнитопаузы [9])  $D_{st}^*$  индекса на главной фазе магнитных бурь, генерированных 4-мя типами солнечного ветра (СВ): MC (10 бурь), CIR (28 буря), Sheath (21 буря), Ejecta (31 буря), аналогично тому, как это было сделано нами ранее для простого  $D_{st}$  индекса [8]. Для идентификации типов СВ использовался “Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976–2000гг.” ([1], <ftp://ftp.iki.rssi.ru/pub/omni/>), созданный на основе данных базы OMNI. Временной ход  $D_{st}^*$  аппроксимировался линейной зависимостью от интегрального электрического поля ( $\text{sum}E_y$ ), динамического давления ( $P_d$ ), и уровня флуктуаций ( $sB$ ) межпланетного магнитного поля (ММП). Было выполнено 3 вида моделирования  $D_{st}^*$ : 1 – индивидуальными значениями коэффициентов аппроксимации; 2 – коэффициентами аппроксимации, усредненными по типу СВ; 3 – так же, как в 2, но с учетом значений  $D_{st}^*$  индекса, предшествующих началу главной фазы магнитной бури. Результаты моделирования корреktированного  $D_{st}^*$  индекса сравниваются с моделированием обычного  $D_{st}$  индекса. В условиях большого статистического разброса коэффициентов аппроксимации, использование  $D_{st}$  вместо  $D_{st}^*$  на точность моделирования и коэффициент корреляции влияет незначительно.

DOI: 10.7868/S0023420615020077

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа посвящена моделированию временного хода корреktированного (с учетом токов магнитопаузы)  $D_{st}^*$  индекса на главной фазе магнитных бурь, генерированных разными крупномасштабными типами солнечного ветра (СВ), и является продолжением серии работ по исследованию зависимости геомагнитной активности от параметров межпланетной среды [2–7] и процесса генерации магнитных бурь разными типами СВ [8, 9].

Начиная с работы Бартона и др. [10], было показано, что  $D_{st}$  хорошо моделируется параметрами СВ и ММП. В настоящее время существует большое количество работ, посвященных моделированию магнитных бурь и их предсказанию. Для предсказания  $D_{st}$  индекса используются разные методики, когда система солнечный ветер-магнитосфера рассматривается, как “черный ящик”: искусственные нейронные сети (см. например, [18–20] и ссылки в них), нелинейные авто-регрессионные схемы (см. например, [21, 22] и ссылки в них).

В большинстве работ, посвященных моделированию геомагнитных бурь и их предсказанию (см. например, [10, 12–13, 15–16]), не учитывается тип течения СВ, которым были генерированы магнитные бури. В то же время известно, что разные типы течений СВ по-разному взаимодействуют с магнитосферой (см. например, [2–7, 9, 11, 20, 23–28]). В качестве примера учета типа солнечного ветра при прогнозе космической погоды можно привести одну из последних работ [29].

В наших предыдущих работах [5–9] мы искали функциональную связь между интенсивностью бури и межпланетными параметрами, и для анализа развития главной фазы магнитных бурь и ее моделирования мы использовали обычный геомагнитный индекс  $D_{st}$ . Однако величина  $D_{st}$  индекса во время магнитных бурь является результатом изменений в различных токовых системах: кольцевого тока, тока на магнитопаузе и тока хвоста магнитосферы (см. например, [30–31]). Положение магнитопаузы определяется условием равновесия полных давлений в солнечном ветре и внутри магнитосферы. Изменение динамического давления СВ приводит к смещению положения

магнитопаузы в новое положение равновесия, и это изменение сопровождается как изменением положения токового слоя на магнитопаузе, так и изменением его величины. Для учета вклада этого изменения тока магнитопаузы в магнитосферный  $D_{st}$  индекс предложен скорректированный  $D_{st}^*$  индекс, который определяется по формуле  $D_{st}^* = D_{st} - b(P_d)^{1/2} + c$ , где коэффициенты:  $b$  – мера отклика на изменения динамического давления СВ (с ростом динамического давления  $P_d$  магнитопауза приближается к Земле и вклад связанного с ней тока учитывается в  $D_{st}^*$ );  $c$  – мера токов в спокойные дни (например, [10, 12, 13]). Первоначально коэффициенты  $b$  и  $c$  предполагались постоянными и были получены для спокойного времени по ограниченному интервалу данных СВ в работе [10]. Позднее авторы [12,13] получили новые значения этих коэффициентов, для оценки которых они использовали СВ данные базы OMNI за 30-летний период времени, исходя из предположения их возможной зависимости от величины межпланетного электрического поля ( $E_y = VB_s$ ). Например, в работе [32] авторы показали, что коэффициент  $b$  зависит от величины межпланетного электрического поля  $E_y$ , и с его ростом (до  $E_y = 18$  мВ/м) величина  $b$  уменьшается в 5 раз по сравнению со спокойным временем ( $E_y = 0$ ). Однако, различие в величинах коэффициента  $b$ , полученных разными авторами по разным наборам данных, укладывается в 50% разброс его величины в работах [10, 12, 13, 32].

Используя для моделирования скорректированный  $D_{st}^*$  индекс, мы фактически принимаем во внимание описанный выше физический процесс и его влияние на величину простого  $D_{st}$  индекса.

В предыдущих работах [8, 9] мы учитывали вклад давления СВ в виде аддитивного члена  $c_p \cdot P_d$ , при этом предполагалось, что вклад этого члена мал (т.е. влияние динамического давления СВ на  $D_{st}$  мало) и может быть аппроксимирован линейным членом. Результаты работы [9] показали, что для CIR и Ejecta этот член нельзя считать малым, и это предположение может быть источником ошибки. Поэтому в настоящей работе мы проводим обработку временного хода скорректированного (с учетом токов магнитопаузы)  $D_{st}^*$  индекса, аналогичную той, которую выполнили в работе [9]. Основная задача настоящей работы состоит в том, чтобы получить ответ на вопрос: “Для какого индекса,  $D_{st}$  или  $D_{st}^*$ , лучше работает наш метод моделирования временного хода развития магнитной бури?”.

## 2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА

В данной работе мы выполняем моделирование временного хода скорректированного  $D_{st}^*$  на главной фазе 90 магнитных бурь ( $-250 < D_{st} \leq -50$  нТл), индуцированных 4-мя типами течений солнечного ветра: CIR (28 бурь), Sheath (21 буря), MC (10 бурь), Ejecta (31 буря). Из-за отсутствия данных по скорректированному  $D_{st}^*$  число магнитных бурь от CIR слегка уменьшилось по сравнению с предыдущей статьёй [9], но это не повлияло на результаты (см. таблицу).

При моделировании главной фазы магнитной бури используется линейная аппроксимация величины  $D_{st}^*$  индекса главной фазы магнитной бури 3-мя параметрами солнечного ветра: интегралом конвективного электрического поля солнечного ветра  $\text{sum}E_y$ , динамическим давлением  $P_d$  и вариациями межпланетного магнитного поля  $sB$  [9]:

$$D_{st}(i)^* = c_0^* + c_E^* \cdot \text{sum}E_y(i) + c_P^* \cdot P_d(i) + c_B^* \cdot sB(i), \quad (1)$$

$$\text{sum}E_y(i) = \sum_{k=1}^{k=i} E_y(k),$$

где  $i$  – текущая точка фазы бури, меняется от  $i = 1$  начало фазы до  $i = im$  последняя точка фазы (в  $D_{st \min}$ ); в  $\text{sum}E_y$  – суммирование по  $k$  (от начала бури в точке  $k = 1$  до текущей точки фазы  $k = i$ ). Для каждого типа магнитных бурь моделирование главной фазы проводится в 3 этапа. Сначала определяются индивидуальные коэффициенты аппроксимации ( $c_0^*, c_E^*, c_P^*, c_B^*$ ) для главной фазы отдельной бури каждого типа. Затем коэффициенты аппроксимации главной фазы бури усредняются по типу СВ ( $\langle c_0^* \rangle, \langle c_E^* \rangle, \langle c_P^* \rangle, \langle c_B^* \rangle$ ); на этом

этапе оцениваются вклады в  $D_{st}^*$  индекс главной фазы отдельных параметров СВ ( $\langle c_E^* \rangle \cdot \langle \text{sum}E_y \rangle, \langle c_P^* \rangle \cdot \langle P_d \rangle, \langle c_B^* \rangle \cdot \langle sB \rangle$ ) [9]. На 3-м этапе вносятся поправки, учитывающие историю  $D_{st}^*$  индекса до начала главной фазы магнитной бури. Вместо постоянного среднего значения коэффициента  $\langle c_0^* \rangle$ , для каждой бури  $j$  (внутри данного типа СВ) были взяты значения  $c_0^*(j)$ , рассчитанные из линейной зависимости коэффициента  $c_0^*(j)$  от величины индекса  $\text{ave}D_{st}^*(j)$ , усредненного по 3-м точкам (1 точка – начало бури и 2 предшествующие точки). Методика обработки подробно описана в работах [8, 9].

Для оценки качества моделирования мы используем ( $r$ ) коэффициент линейной корреляции и ( $\sigma$ ) среднеквадратичное отклонение между

Средние и медианные значения коэффициентов аппроксимаций и параметров СВ (со среднеквадратичными отклонениями), а также вклады этих параметров в индексы  $D_{st}^*$  (обозначены звездочками \*) и  $D_{st}$  (обозначения без звездочек) на главной фазе магнитных бурь для 4-х типов СВ

Тип СВ	МС 10 бурь	Sheath 21 буря	CIR 28/31 бурь	Ejecta 31 буря
$\langle c_0^* \rangle$ , нТл	$-32.32 \pm 25.6$	$-28.88 \pm 45.1$	$-38.6 \pm 33.7$	$-40 \pm 28$
медиана*	-20	-20	-35.5	-35
$\langle c_0 \rangle$	$-13.77 \pm 14.4$	$-13.1 \pm 28.8$	$-28.7 \pm 30.5$	$-30.7 \pm 23.1$
медиана	-11	-18	-32	-32
$\langle c_E^* \rangle$ , нТл/В м <sup>-1</sup> ч	$-2.04 \pm 1.1$	$-3.4 \pm 1.9$	$-2.98 \pm 1.5$	$-2.1 \pm 1.1$
медиана*	2	-3	-2.9	-1.7
$\langle c_E \rangle$	$-2.55 \pm 0.75$	$-3.2 \pm 1.6$	$-2.82 \pm 1.1$	$-2.3 \pm 1.0$
медиана	-2.4	-3.3	-2.8	-2.2
$\langle c_P^* \rangle$ , нТл/нПа	$-0.8 \pm 3.5$	$0.38 \pm 3.4$	$2.72 \pm 3.65$	$1.9 \pm 4.5$
медиана*	0	-0.5	2.5	1.6
$\langle c_P \rangle$	$-0.92 \pm 2.9$	$0.97 \pm 3.3$	$3.3 \pm 3.7$	$2.8 \pm 3.9$
медиана	1	1	2.6	2.8
$\langle c_B^* \rangle$ , безрм.	$1.29 \pm 3.95$	$-0.57 \pm 2.3$	$-0.53 \pm 2.3$	$-0.4 \pm 2.7$
медиана*	0	-1.3	-0.6	0
$\langle c_B \rangle$	$1.28 \pm 3.3$	$-0.8 \pm 1.8$	$-0.19 \pm 1.96$	$-0.2 \pm 2.1$
медиана	0	-1	0	0
$\langle \sum E_y^* \rangle$	$16.24 \pm 9.78$	$16.4 \pm 13.5$	$13.7 \pm 10.7$	$15.6 \pm 11.8$
$\langle \sum E_y \rangle$			$13.3 \pm 10.4$	
$\langle c_E^* \rangle \cdot \langle \sum E_y^* \rangle$	-33.12	-55.8	-40.8	-32.8
$\langle c_E \rangle \cdot \langle \sum E_y \rangle$	-41.41	-52.5	-37.5	-35.9
$\langle P_d^* \rangle$	$3.62 \pm 2.27$	$5.7 \pm 5.7$	$5.4 \pm 3.1$	$4.3 \pm 2.7$
$\langle P_d \rangle$			$5.5 \pm 3.1$	
$\langle c_P^* \rangle \cdot \langle P_d^* \rangle$	-2.89	2.16	14.7	8.2
$\langle c_P \rangle \cdot \langle P_d \rangle$	-3.33	5.5	18.15	12.04
$\langle sB^* \rangle$	$3.07 \pm 2.4$	$5.1 \pm 4.1$	$5.3 \pm 3.3$	$3.6 \pm 2.5$
$\langle sB \rangle$			$5.4 \pm 3.3$	
$\langle c_B^* \rangle \cdot \langle sB^* \rangle$	3.96	-2.9	-2.8	-1.44
$\langle c_B \rangle \cdot \langle sB \rangle$	3.93	-4.08	-1.03	-0.72

корректированным  $D_{st}^*$  и модельным  $D_{st\text{mod}}^*$  индексами [9].

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

В таблице для 4-х типов течений СВ (МС, Sheath, CIR, Ejecta) приведены средние и медианные значения коэффициентов аппроксимации корректированного  $D_{st}^*$  индекса главной фазы магнитных бурь ( $\langle c_0^* \rangle, \langle c_E^* \rangle, \langle c_P^* \rangle, \langle c_B^* \rangle$  со среднеквадратичными отклонениями), средних параметров СВ ( $\langle \text{sum} E_y^* \rangle, \langle P_d^* \rangle, \langle sB^* \rangle$  и их среднеквадратичные отклонения), а также вклады этих параметров ( $\langle c_E^* \rangle \cdot \langle \text{sum} E_y^* \rangle, \langle c_P^* \rangle \cdot \langle P_d^* \rangle, \langle c_B^* \rangle \cdot \langle sB^* \rangle$ ) в величину  $D_{st}^*$  индекса (обозначены звездочками \*). Для сравнения в таблице также представлены аналогичные параметры для измеренного  $D_{st}$  индекса (обозначения без звездочек), полученные нами ранее в работе [9]. Для обоих индексов средние значения интегрального электрического поля  $\langle \text{sum} E_y \rangle$ , динамического давления  $\langle P_d \rangle$  и уровня флуктуаций ММП  $\langle sB \rangle$  совпадают, и не приводятся в таблице, за исключением бурь от CIR, статистика которых уменьшилась, но соответствующие им значения, приведенные в таблице, близки между собой.

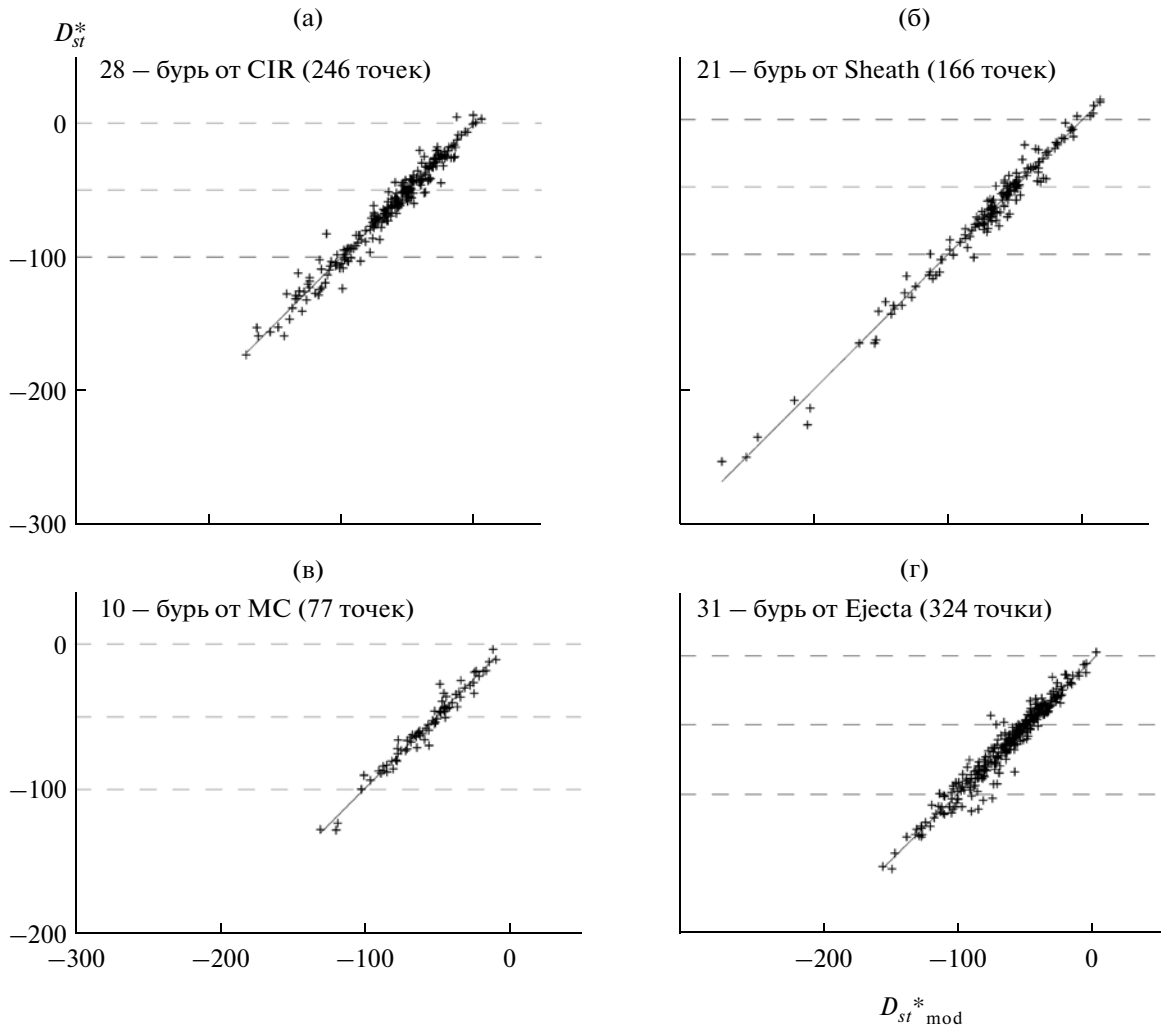
Как следует из таблицы, для  $D_{st}^*$  среднее значение коэффициента  $\langle c_0^* \rangle$  сильно отрицательное и слабо зависит от типа СВ драйвера магнитной бури (различие  $\sim 38\%$  между высоким (отрицательным) значением для Ejecta-бурь и низким для Sheath-бурь). В зависимости от типа бурь величина коэффициента  $\langle c_E^* \rangle$  меняется в пределах  $65\%$  (между самым высоким (отрицательным) значением для Sheath- бурь и низким для бурь от МС). С учетом большого разброса каждого из коэффициентов для всех 4-х типов СВ, видно, что коэффициенты  $\langle c_E^* \rangle$  заметно различаются в зависимости от типа СВ (они больше для областей сжатия CIR и Sheath и меньше для МС и Ejecta). Величина коэффициента  $\langle c_P^* \rangle$  слегка отрицательная для МС-бурь, но слегка положительная для остальных типов Sheath-, CIR- и Ejecta-бурь (в зависимости от типа СВ различие между положитель-

ными коэффициентами  $\langle c_P^* \rangle$  достигает 7 раз, с минимальным значением для Sheath-бурь и максимальным для CIR-бурь). Можно предположить, что для МС- и Sheath-бурь коэффициент  $\langle c_P^* \rangle \sim 0$ , а для CIR- и Ejecta-бурь коэффициент  $\langle c_P^* \rangle$  высокий (2.7 и 1.9 соответственно), но для повышения значимости результата для этих типов бурь требуются дополнительные исследования. Величина коэффициента  $\langle c_B^* \rangle$  близка к величине  $\langle c_P^* \rangle$ , но противоположна по знаку.

Для всех типов бурь интегральное электрическое поле дает наибольший вклад в развитие  $D_{st}^*$  главной фазы ( $\langle c_E^* \rangle \cdot \langle \text{sum} E_y^* \rangle$  в таблице), с максимальным изменением (примерно в 1.7 раз) между бурями от Sheath и от Ejecta. Вклад динамического давления  $\langle c_P^* \rangle \cdot \langle P_d^* \rangle$  невелик для различных типов СВ (меняется между  $\sim 3\%$  для Sheath и  $\sim 36\%$  для CIR): он изменяется от умеренного вклада для бури от CIR и от Ejecta (ослабляет бури) до малого для бури от МС и от Sheath (усиливает бурю на  $\sim 10\%$ ). Вклад магнитных флуктуаций  $\langle c_B^* \rangle \cdot \langle sB^* \rangle$  в развитие  $D_{st}^*$  невелик; для всех типов бурь он противоположен по знаку к вкладам динамического давления, что приводит в их частичной компенсации для МС- и Sheath-бурь (на  $\sim 74\%$ ), и для CIR- и Ejecta-бурь (в пределах  $\sim 19\%$ ).

На рис. 1 представлены результаты 1-го этапа моделирования корректированного  $D_{st}^*$  индекса — по индивидуальным коэффициентам аппроксимации главной фазы бури. Коэффициенты корреляции ( $r$ ) и среднеквадратичные отклонения ( $\sigma$ ), характеризующие качество моделирования, представлены на рис. 4 (а, б). Моделирование с индивидуальными коэффициентами аппроксимации (этап 1) очень хорошо описывает  $D_{st}^*$  главной фазы для всех типов СВ. Самая высокая точность моделирования  $D_{st}^*$  у МС-бурь, и низкая — у Sheath-бурь (различие в 1.3 раза). Для всех типов СВ коэффициенты корреляции очень высокие (в пределах  $r \sim 0.97-0.99$ ).

На рис. 2 приведены результаты 2-го этапа моделирования  $D_{st}^*$  с помощью коэффициентов аппроксимации, которые усредняются по типу СВ, и поэтому эта модель легко может быть использована для прогнозирования величины бури в ре-



**Рис. 1.** Зависимость скорректированного  $D_{st}^*$  индекса от модельного значения  $D_{st\text{ mod}}^*$  с индивидуальными коэффициентами аппроксимации для магнитных бурь с разным типом СВ (этап 1).

альном времени, так как коэффициенты известны заранее [8]. На рис. 4 (в, г) видно, что точность моделирования для  $D_{st}^*$  меняется примерно в 1.5 раза между самой высокой для MC- и Ejecta-бурь и самой низкой для Sheath-бурь; а коэффициент корреляции самый низкий для MC-бурь и самый высокий для Sheath-бурь (в пределах  $r \sim 0.63-0.77$ ).

На рис. 3 и 4 (д, е) представлены результаты 3-го этапа моделирования  $D_{st}^*$  главной фазы, когда модельные значения  $D_{st\text{ mod}}^*$  рассчитываются с использованием усредненных по типу СВ коэффициентов аппроксимаций (как на предыдущем этапе 2), но с учетом значений  $D_{st}^*$  индекса, предшествующих началу главной фазы магнитной бури (см. [8, 9]). Точность 3-го этапа моделирования  $D_{st}^*$  меняется в  $\sim 1.7$  раз от самой высокой для MC- и Ejecta-бурь до самой низкой для Sheath-

бурь. Коэффициент корреляции высокий и меняется в пределах  $r \sim 0.79-0.82$ .

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Средние значения коэффициентов аппроксимации как для скорректированного  $D_{st}^*$ , так и для измеренного  $D_{st}$  индекса меняются в зависимости от типа СВ похожим образом, но различаются между собой по величине незначительно, в пределах разбросов этих коэффициентов. Для всех типов СВ величина  $\langle c_0^* \rangle$  (по сравнению с коэффициентом  $\langle c_0 \rangle$ ) увеличивается (в 2.3 и 2.4 раза более отрицательный для MC и Sheath-бурь, на 35 и 33% для CIR- и Ejecta-бурь); для каждого типа СВ коэффициенты  $\langle c_E^* \rangle$  отличаются мало (в пре-

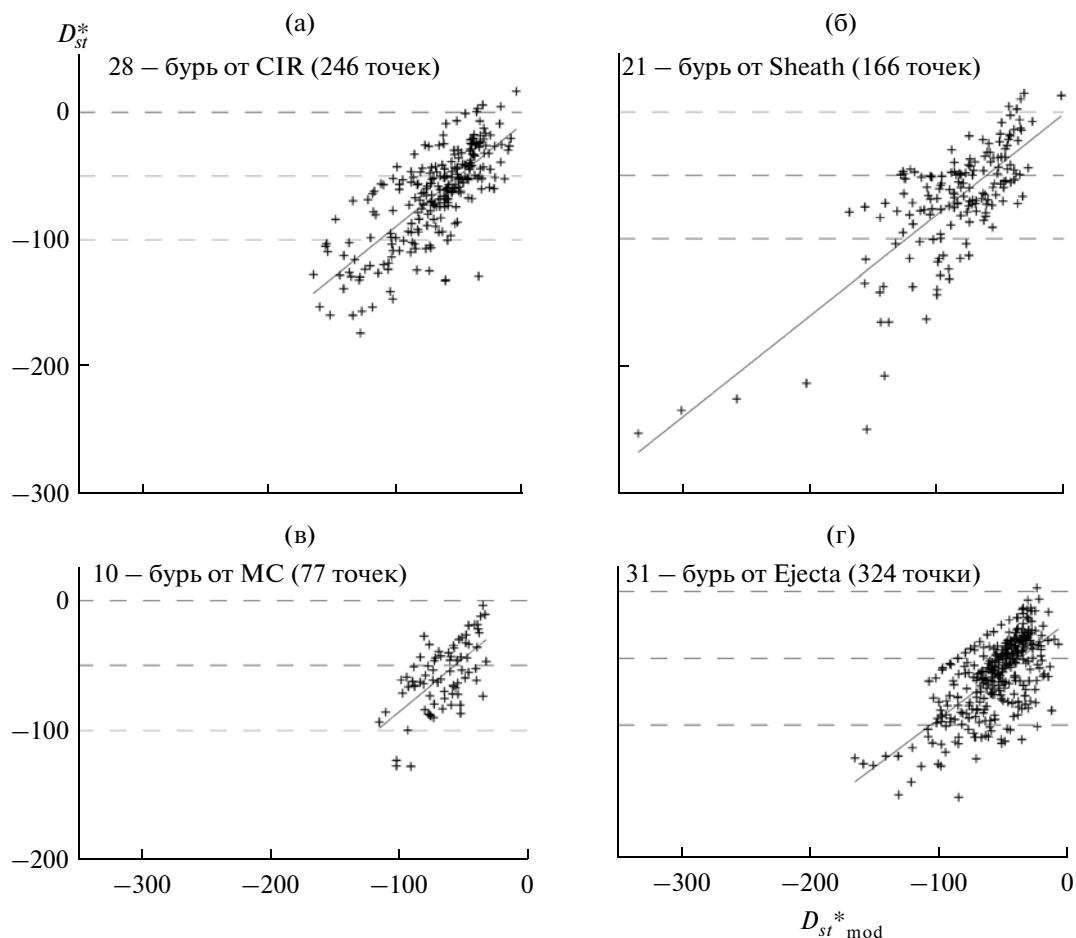


Рис. 2. То же, что на рис. 1, но для  $D_{st\ mod}^*$  с усредненными по типу СВ коэффициентами аппроксимации (этап 2).

делах 25%) от коэффициентов  $\langle c_E \rangle$ ; коэффициент  $\langle c_P \rangle$ , по сравнению с  $\langle c_P \rangle$ , сильно уменьшился для Ejecta- и Sheath-бурь (в 1.5–2 раза, оставаясь положительным); коэффициент  $\langle c_B \rangle$ , по сравнению с  $\langle c_B \rangle$ , увеличился (в 2–2.5 раза стал более отрицательным) для Ejecta- и CIR-бурь, но уменьшился для Sheath-бурь (в 1.4 раза стал менее отрицательным) и не изменился для MC.

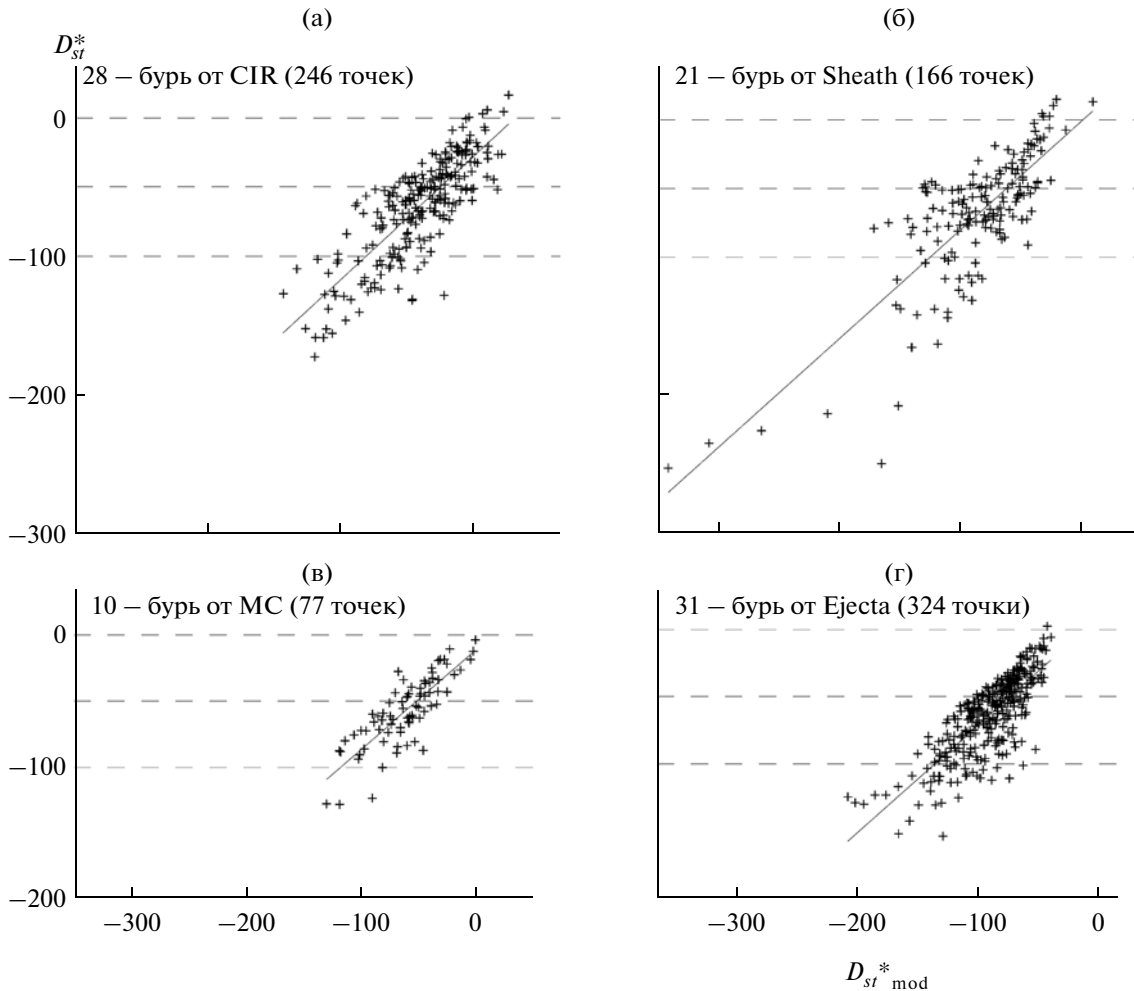
По сравнению с  $D_{st}$  индексом, вклады отдельных параметров во временной ход корректированного  $D_{st}^*$  меняются следующим образом:

1) вклад интегрального электрического поля  $\langle c_E \rangle \cdot \langle \sum E_y \rangle$  изменился незначительно (в пределах 6–32%) для всех типов СВ (оставаясь наибольшим по сравнению с другими членами уравнения аппроксимации);

2) вклад динамического давления  $\langle c_P \rangle \cdot \langle P_d \rangle$  слегка уменьшился для MC-бурь и CIR-бурь (в пределах 15–23%), но сильнее для Ejecta- и Sheath-бурь (1.5–2.5 раза);

3) вклад флуктуаций  $\langle c_B \rangle \cdot \langle sB \rangle$  увеличился (более отрицательное значение) для бурь от Ejecta в 2 раза и для бурь от CIR в 2.7 раз; но наблюдается уменьшение вклада на 41% (менее отрицательное значение) для бурь от Sheath; для MC-бурь вклады одинаковые.

Важно отметить, что формальный переход от  $D_{st}$  индекса к  $D_{st}^*$  индексу выражается в попытке учета вклада в индекс давления солнечного ветра через член  $b(P_d)^{1/2}$ , однако при аппроксимации нашей моделью остается зависимость  $D_{st}^*$  индекса от давления  $P_d$ : для 2-х типов бурь от CIR и от Ejecta коэффициент  $\langle c_P \rangle$  не обращается в нуль и



**Рис. 3.** То же, что на рис. 1 и 2, но для  $D_{st}^*$  mod с учетом значений  $D_{st}^*$  индекса, предшествующих началу главной фазы магнитной бури (этап 3).

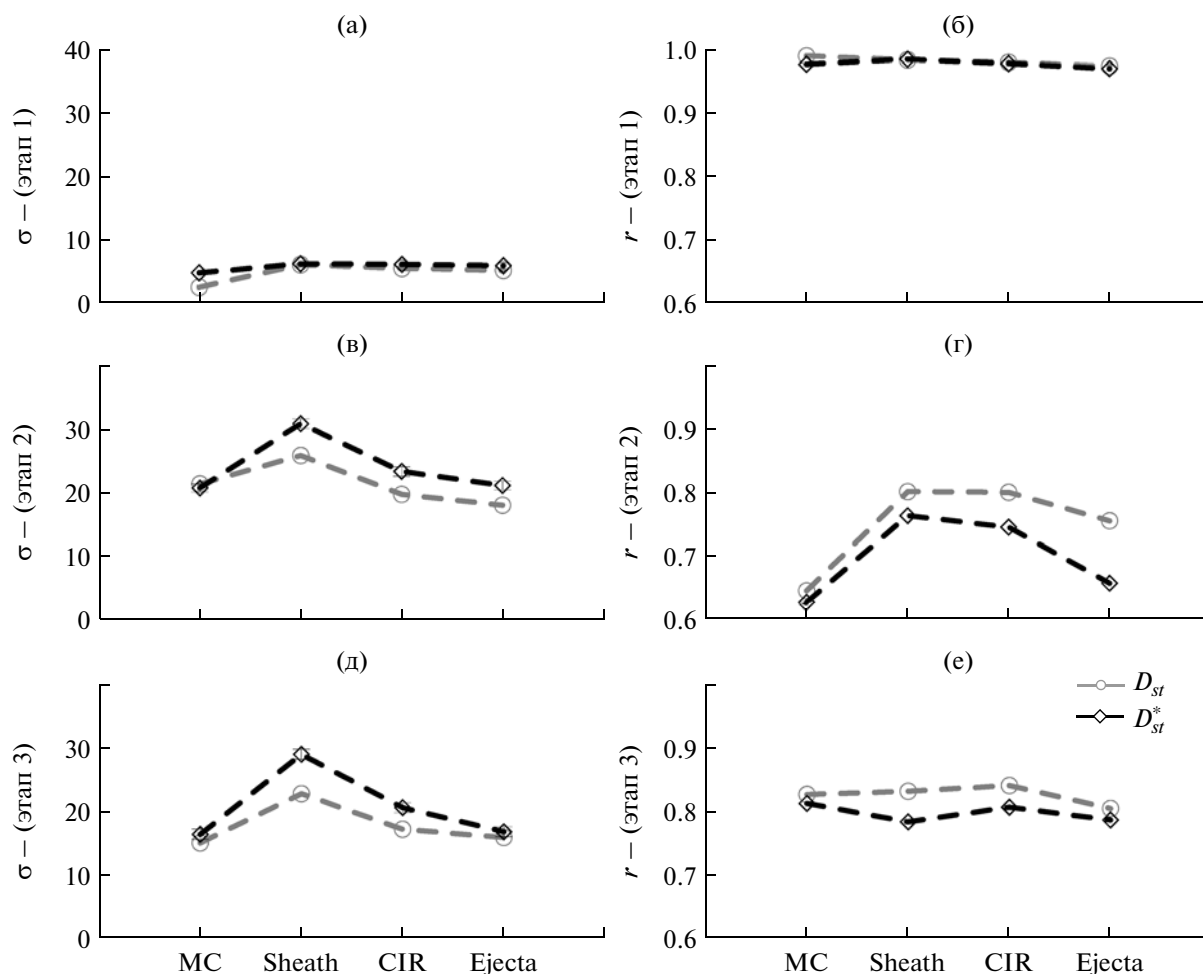
вклад давления  $\langle c_p^* \rangle \cdot \langle P_d^* \rangle$  остается заметным (хотя и уменьшается). Таким образом, наши результаты демонстрируют, что в скорректированном  $D_{st}^*$  индексе присутствует зависимость от давления, возможно, для всех типов СВ (особенно для CIR и Ejecta), что согласуется с результатами других работ [11, 14, 26, 33, 34], демонстрирующих достаточно сложную связь  $D_{st}$  индекса с другими параметрами СВ.

На 1-м этапе моделирования скорректированного  $D_{st}^*$ , по сравнению с моделированием  $D_{st}$ , характерно ухудшение точности моделирования (увеличение среднеквадратичного отклонения  $\sigma$ ) для всех типов СВ, но сильнее всего для MC-бурь (~2 раза). Величины коэффициентов корреляции меняются мало (в пределах ~1%).

По сравнению с  $D_{st}$  индексом, 2-й этап моделирования скорректированного  $D_{st}^*$  характеризуется понижением точности почти для всех типов СВ (в пределах 17–19%), кроме MC-бурь (улучшение на ~3%), и уменьшением коэффициента корреляции для всех типов СВ (в пределах 3–15%), сильнее всего для Ejecta.

По сравнению с моделированием  $D_{st}$  индекса, точность 3-го этапа моделирования  $D_{st}^*$  также ухудшается для всех 4-х типов СВ (~5–25%), но сильнее для областей сжатия CIR и Sheath (19–25%), чем для Ejecta и MC (5–9%). Коэффициент корреляции понизился для всех типов СВ (в пределах ~2–6%), но сильнее для CIR- и Sheath-бурь (4–6%), чем для MC- и Ejecta-бурь (~2%).

Необходимо еще раз подчеркнуть, что разбросы средних коэффициентов аппроксимации до-



**Рис. 4.** Среднеквадратичные отклонения ( $\sigma$ ) и коэффициенты корреляции ( $r$ ) в зависимости от типа СВ на 3-х этапах моделирования главной фазы: а, б – индивидуальными коэффициентами (этап 1); в, г – усредненными по типу СВ коэффициентами аппроксимаций (этап 2); д, е – с учетом значений  $D_{st}^*$  индекса, предшествующих началу главной фазы магнитной бури (этап 3).

статочны велики, и, за исключением  $\langle c_E^* \rangle$ , существенно превышают их различие между типами СВ. Поэтому можно говорить лишь о тенденциях в различиях.

Основные выводы:

1) При нашем методе моделирования измеренный  $D_{st}$  индекс реальнее отражает динамику главных фаз магнитных бурь от всех типов СВ на всех этапах моделирования, чем скорректированный  $D_{st}^*$  индекс. На это указывает более высокий коэффициент корреляции  $r$  и более низкие значения  $\sigma$ .

2) На 2-м этапе моделирования измеренный  $D_{st}$  индекс лучше, чем скорректированный  $D_{st}^*$  индекс, описывает вариации главной фазы Ejecta-

бурь (т.к. более высокий коэффициент корреляции); но более сильное улучшение точности (уменьшение среднеквадратичного отклонения  $\sigma$ )  $D_{st}$  (по сравнению с  $D_{st}^*$ ) у Sheath-бурь.

3) На 3-м этапе моделирования (с учетом значений индекса, предшествующих началу главной фазы магнитной бури) оба индекса  $D_{st}$  и  $D_{st}^*$  почти одинаково хорошо описывают вариации главных фаз бурь от MC и Ejecta (близкие коэффициенты корреляции и точности). В то время как Sheath- и CIR-бури лучше описываются простым индексом  $D_{st}$ , чем скорректированным  $D_{st}^*$ .

Авторы благодарны за возможность использования базы данных OMNI. Данные OMNI получены из GSFC/SPDF OMNIWeb на сайте <http://omniweb.gsfc.nasa.gov>. Работа поддержана



грантами РФФИ № 13-02-00158а, а также Программой Президиума РАН № П 22.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г., Ермолаев М.Ю. Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976–2000 г. // Космич. исслед. Т. 47. № 2. С. 99–113. 2009. (Cosmic Research. P. 81.)
2. Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г., Николаева Н.С., Ермолаев М.Ю. Статистическое исследование влияния межпланетных условий на геомагнитные бури // Космич. исслед. 2010. Т. 48. № 6. С. 499–515. (Cosmic Research. P. 485.)
3. Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г., Николаева Н.С., Ермолаев М.Ю. Статистическое исследование влияния межпланетных условий на геомагнитные бури. 2. Вариации параметров // Космич. исслед. 2011. Т. 49. № 1. С. 24–37. (Cosmic Research. P. 21.)
4. Yermolaev Yu.I., Nikolaeva N.S., Lodkina I.G., Yermolaev M.Yu. Specific interplanetary conditions for CIR-, Sheath-, and ICME-induced geomagnetic storms obtained by double superposed epoch analysis // Ann. Geophys. 2010. V. 28. P. 2177–2186.
5. Николаева Н.С., Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г. Зависимость геомагнитной активности во время магнитных бурь от параметров солнечного ветра для разных типов течений // Геомагнетизм и аэронаука. 2011. Т. 51. № 1. С. 51–67.
6. Николаева Н.С., Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г. Зависимость геомагнитной активности во время магнитных бурь от параметров солнечного ветра для разных типов течений. 2. Главная фаза бури // Геомагнетизм и аэронаука. 2012. Т. 52. № 1. С. 42–53.
7. Николаева Н.С., Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г. Зависимость геомагнитной активности во время магнитных бурь от параметров солнечного ветра для разных типов течений. 3. Развитие бури // Геомагнетизм и аэронаука. 2012б. Т. 52. № 1. С. 42–53.
8. Николаева Н.С., Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г. Зависимость геомагнитной активности во время магнитных бурь от параметров солнечного ветра для разных типов течений 4. Моделирование для магнитных облаков // Геомагнетизм и аэронаука. 2014. Т. 54. № 2. С. 163–173.
9. Николаева Н.С., Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г. Моделирование временного хода  $D_{st}$  индекса на главной фазе магнитных бурь, генерированных разными типами солнечного ветра // Космич. исслед. 2013. Т. 51. № 6. С. 443–454. (Cosmic Research. P. 401.)
10. Burton R.K., McPherron R.L., Russell C.T. An empirical relationship between interplanetary conditions and Dst // J. Geophys. Res. 1975. V. 80. P. 4204–4214.
11. Fenrich F.R., Luhmann J.G. Geomagnetic response to magnetic clouds of different polarity // Geophys. Res. Lett. 1998. V. 25. P. 2999–3002.
12. O'Brien T.P., McPherron R.L. An empirical phase space analysis of ring current dynamics: Solar wind control of injection and decay // J. Geophys. Res. 2000. V. 105. P. 7707–7720.
13. O'Brien T.P., McPherron R.L. Forecasting the ring current index Dst in real time // J. of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2000. V. 62. P. 1295–1299.
14. Wang C.B., Chao J.K., Lin C.H. Influence of the solar wind dynamic pressure on the decay and injection of the ring current // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. № A9. P. 1341. doi:10.1029/2003JA009851.
15. Siscoe G., McPherron R.L., Liemohn M.W. et al. Reconciling prediction algorithms for Dst // J. Geophys. Res. 2005. V. 110. P. A02215. doi: 10.1029/2004JA010465.
16. Podladchikova T.V., Petrukovich A.A. Extended geomagnetic storm forecast ahead of available solar wind measurements // Space Weather. 2012. V. 10. S07001. doi: 10.1029/2012SW000786.
17. Vassiliadi, D., Klimas A., Baker D. Models of Dst geomagnetic activity and of its coupling to solar wind parameters // Phys. Chem. Earth. 1999. V. 24. P. 107–112. doi: 10.1016/S1464-1917(98)00016-6.
18. Wu J.-G., Lundstedt H. Geomagnetic storm predictions from solar wind data with the use of dynamic neural networks // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. P. 14.255–14.268. doi: 10.1029/97JA00975.
19. Lundstedt H., Gleisner H., Wintoft P. Operational forecasts of the geomagnetic Dst index // Geophys. Res. Lett. 2002. V. 29. № 24. P. 2181. doi: 10.1029/2002GL016151.
20. Barkhatov N.A., Levitin A.E., Revunov S.E. Complex Classification of Global Geomagnetic Disturbances // Cosmic Research. 2006. V. 44. № 6. P. 468–478. (Kosmicheskie Issledovaniya. 2006. V. 44. № 6. P. 488–499.)
21. Balikhin M.A., Boynton R.J., Billings S.A. et al. Data based quest for solar wind-magnetosphere coupling function // Geophys. Res. Lett. 2010. V. 37. L24107. doi: 10.1029/2010GL045733.
22. Boynton R.J., Balikhin M.A., Billings S.A., Amariutei O.A. Application of nonlinear autoregressive moving average exogenous input models to geospace: advances in understanding and space weather forecasts // Ann. Geophys. 2013. V. 31. P. 1579–1589.
23. Borovsky J.E., Denton M.H. Differences between CME-driven storms and CIR-driven storms // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. A07S08. doi: 10.1029/2005JA011447.
24. Denton M.H., Borovsky J.E., Skoug R.M. et al. Geomagnetic storms driven by ICME and CIR-dominated solar wind // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. A07S07. doi:10.1029/2005JA011436.
25. Pulkkinen T.I., Partamies N., Huttunen K.E.J. et al. Differences in geomagnetic storms driven by magnetic clouds and ICME sheath regions // Geophys. Res. Lett. 2007. V. 34. L02105. doi:10.1029/2006GL027775.
26. Turner N.E., Cramer W.D., Earles S.K., Emery B.A. Geoefficiency and Energy Partitioning in CIR-Driven

- and CME-Driven Storms // *J. of Atmosph. and Sol.-Terrest. Phys.* 2009. V. 71. P. 1023–1031.
27. *Despirak I.V., Lubchich A.A., Guineva V.* Development of substorm bulges during storms of different interplanetary origins // *J. of Atmosph. and Sol.-Terrest. Phys.* 2011. V. 73. P. 1460–1464.
28. *Yermolaev Y.I., Nikolaeva N.S., Lodkina I.G., Yermolaev M.Y.* Geoeffectiveness and efficiency of CIR, sheath, and ICME in generation of magnetic storms // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. A00L07. doi: 10.1029/2011JA017139.
29. *Бархатов Н.А., Левитин А.Е., Ревунова Е.А.* Классификация комплексов космической погоды с учетом типа солнечного источника, характеристик плазменного потока и создаваемого им геомагнитного возмущения // *Геомагнетизм и аэронавигация.* 2014. Т. 54. № 2. С. 185.
30. *Tsyganenko N.A., Sitnov M.I.* Modeling the dynamics of the inner magnetosphere during strong geomagnetic storms // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. A03208. doi:10.1029/2004JA010798.
31. *Левитин А.Е., Дремухина Л.А., Громова Л.И., Птицына Н.Г.* Моделирование гигантских возмущений геомагнитного поля // *Physics of Auroral Phenomena*. Proc. XXXIV Annual Seminar. Apatity. 2011. P. 29–32.
32. *Siscoe G.L., McPherron R.L., Jordanova V.K.* Diminished contribution of ram pressure to *Dst* during magnetic storms // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. A12227. doi:10.1029/2005JA011120.
33. *O'Brien T.P., McPherron R.L.* Evidence against an independent solar wind density driver of the terrestrial ring current // *Geophys. Res. Lett.* 2000. V. 27. P. 3797–3799.
34. *Asikainen T., Maliniemi V., Mursula K.* Modeling the contributions of ring, tail, and magnetopause currents to the corrected *Dst* index // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. A12203. doi:10.1029/2010JA015774.