

УДК 523.62-726

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

© 2013 г. Н. С. Николаева, Ю. И. Ермолаев, И. Г. Лодкина

Институт космических исследований РАН, г. Москва

nnikolae@iki.rssi.ru

Поступила в редакцию 24.12.2012 г.

В работе приводятся результаты моделирования временного хода  $D_{st}$  индекса на главной фазе 93-х магнитных бурь ( $-250 < D_{st} \leq -50$  нТл), вызванных разными типами течений солнечного ветра (СВ): магнитными облаками (МС, 10 бурь), коротящими областями взаимодействия (CIR, 31 буря), областью сжатия перед межпланетными корональными выбросами (Sheath перед ICME, 21 буря), “поршнями” (Ejecta, 31 буря). Исходными данными для анализа является “Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976–2000 гг.” (<ftp://ftp.iki.rssi.ru/pub/omni/>), созданный на основе данных базы OMNI. Главная фаза магнитных бурь аппроксимируется линейной зависимостью от основных параметров солнечного ветра: интегрального электрического поля  $\text{sum}E_y$ , динамического давления  $P_d$ , и уровня флуктуаций  $sB$  ММП. Для всех типов СВ главная фаза магнитных бурь лучше всего моделируется индивидуальными значениями коэффициентов аппроксимации: высокий коэффициент корреляции и низкое среднеквадратичное отклонение между модельными и измеренными значениями  $D_{st}$ . Точность данной модели выше для бурь от МС, и в  $\sim 2$  раза хуже для бурь от других типов СВ. Версия модели с коэффициентами аппроксимации, усредненными по типу СВ, хуже описывает вариации измеренного  $D_{st}$  индекса: коэффициент корреляции самый низкий для бурь от МС и самый высокий для Sheath- и CIR-бурь; точность модели самая высокая для бурь от Ejecta и в  $\sim 1.42$  раза ниже для бурь от Sheath. Введение поправок на предысторию развития начала главной фазы магнитной бури улучшает параметры моделирования для всех типов межпланетных источников бурь: коэффициент корреляции меняется в диапазоне от  $r = 0.81$  для бурь от Ejecta до  $r = 0.85$  для бурь от Sheath; самая высокая точность у бурь от МС, и в  $\sim 1.5$  раза ниже для Sheath-бурь.

DOI: 10.7868/S0023420613060034

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Данная работа посвящена моделированию временного хода  $D_{st}$  индекса на главной фазе магнитных бурь, индуцированных разными типами течений солнечного ветра (СВ). Она является продолжением серии работ [1–7], посвященных исследованию процесса генерации магнитных бурь разными типами течений солнечного ветра. Опираясь на наши результаты о том, что  $D_{st}$  индекс на главной фазе магнитной бури хорошо аппроксимируется линейной функцией интеграла  $B_z$  компоненты межпланетного магнитного поля ММП (заменяемого при обработке данных на суммирование  $\text{sum}B_z$ ) или интеграла электрического поля  $E_y$  ( $\text{sum}E_y$ ) [1–3], мы в предыдущих работах [4–6] показали, что линейный характер зависимости  $D_{st}$  от  $\text{sum}E_y$  в среднем наблюдается для всех типов солнечного ветра, но отличается по величине коэффициентов. Для нескольких типов магнитных бурь, связанных, в основном, с областями сжатия (CIR, Sheath), интенсивность

магнитной бури сильнее растет ( $D_{st}$  понижается) в подгруппе точек главной фазы с высоким динамическим давлением. На фоне зависимости  $D_{st}$  от  $\text{sum}E_y$  на главной фазе магнитных бурь почти для всех типов течений наблюдается очень слабая зависимость от уровня флуктуаций  $sB$  ММП [5, 6].

Отметим, что линейный характер зависимости  $D_{st}$  на главной фазе магнитной бури от интеграла  $E_y$  ( $\text{sum}E_y$ ) следует из работы [8] в случае пренебрежения на главной фазе бури членом, связанным с распадом кольцевого тока. Этот результат подтвержден в ряде работ (без селекции магнитных бурь по типу их источника в солнечном ветре) (см. например, работы [9–11] и ссылки в них).

На основании этих результатов, ранее нами было выполнено моделирование поведения  $D_{st}$  индекса на главной фазе магнитных бурь, индуцированных магнитными облаками (МС). При этом предполагалось, что ключевую роль для развития главной фазы играет линейная связь между  $D_{st}$  и интегралом электрического поля  $E_y$ , а зави-

симости от давления  $P_d$  и вариаций  $sB$  ММП считались малыми [7]. Полученные результаты показали, что предложенные подходы позволяют не только удовлетворительно описать связь межпланетных параметров МС с динамикой  $D_{st}$  индекса, но и построить прогностические схемы для предсказания величины  $D_{st}$  на 1–2 часа вперед.

В настоящее время существует большое количество работ, посвященных моделированию магнитных бурь и их предсказанию (см. например, [8, 12–19] и ссылки в них). Для предсказания  $D_{st}$  индекса используются разные методики, например, метод фильтров, когда система солнечный ветер-магнитосфера рассматривается, как “черный ящик”, искусственные нейронные сети, нелинейные авто-регрессионные схемы (см. например, [20–32]).

В подавляющем большинстве работ не учитывается, каким типом течения СВ были генерированы бури. Однако существуют работы, которые показывают, что различные типы течений СВ приводят к разным возмущениям магнитосферы (см. например, [1–6, 33–47]).

В одной из последних работ [32] проводится сравнение 6-ти разных моделей [8, 13, 14, 16, 27, 28, 31] по результатам предсказания 63-х сильных магнитных бурь (минимум  $D_{st} \leq -100$  нТл), которые были разделены на 4 группы в зависимости от типа их источника в СВ. Отдельно анализировались: 27 sMC-бурь (МС с предшествующей ему быстрой ударной волной), 18 SH событий (область сжатия Sheath), 8 CIR событий (коротирующие области взаимодействия), 10 nonMC событий (т.е. тип ICME, но структура поля отличается от МС, т.е. Ejecta). В результате было показано, что TL модель [27, 28] является наилучшей для предсказания  $D_{st}$  индекса сильных магнитных бурь при любом типе источника в СВ, а также для всех 63-х сильных бурь и для всех 139-ти умеренных и сильных магнитных бурь без разделения по типам источников в СВ.

Мы используем традиционное описание динамики бури  $D_{st}$ -индексом, для которого имеются длинные однородные ряды данных, несмотря на то, что в его величину могут вносить свой вклад различные токовые системы магнитосферы и ионосферы (см. например, [48, 49]).

В данной работе проверяется возможность аппроксимации главной фазы магнитных бурь, генерированных 4-мя типами течений солнечного ветра, линейной зависимостью от параметров солнечного ветра: интегрального электрического поля  $\text{sum}E_y$ , динамического давления  $P_d$ , и уровня флуктуаций  $sB$  ММП. Справедливость этих предположений проверяется сравнением результатов расчета с экспериментальными данными и с результатами моделирования в других работах.

Основная цель нашей работы – выявление различий в развитии главной фазы магнитных бурь, источником которых являются разные типы течений солнечного ветра (CIR, Sheath, МС, Ejecta) путем сопоставления результатов моделирования главной фазы для разных типов бурь и оценки вкладов основных параметров СВ в  $D_{st}$  индекс главной фазы бури.

## 2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА

На основе данных базы OMNI для интервала 1976–2000 годов [50] нами были идентифицированы крупномасштабные типы солнечного ветра (см. “Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976–2000 гг.” по адресу <ftp://ftp.iki.rssi.ru/pub/omni/> и статью [51]). Методика идентификации крупномасштабных течений солнечного ветра состоит в сравнении каждой точки базы данных OMNI [50] с набором пороговых критериев по ключевым параметрам солнечного ветра и ММП и подробно описана в работе [51].

В данной работе из анализа исключались магнитные бури, для которых в базе данных OMNI имелись пропуски измерений, позволяющие рассчитать 3 параметра ( $E_y$ ,  $P_d$  и  $sB$ ) в период главной фазы магнитной бури. Кроме того, для уменьшения погрешности и улучшения аппроксимации были исключены бури, имеющие коэффициенты аппроксимаций, которые выходят за пределы 2-х среднеквадратичных отклонений от среднего значения [7]. В результате для анализа было отобрано 93 магнитные бури ( $-250 < D_{st} \leq -50$  нТл), индуцированные 4-мя типами течений солнечного ветра: CIR (31 буря), Sheath (21 буря), МС (10 бурь), Ejecta (31 буря).

В ряде предшествующих работ [52–54] было показано, что самые сильные (в среднем) магнитные бури, вызванные спорадическими (т.е. совокупностью Sheath + ICME) течениями, связаны с неизоллированными событиями, когда расстояние между последовательными межпланетными явлениями (между приходом межпланетных ударных волн и SSC) было менее 40 часов. В данной работе мы не анализировали расстояния между явлениями СВ, но мы сортировали бури и сопоставляли их с источником в СВ следующим образом. Если между минимумами  $D_{st}$  время было больше 24 часов, то бури считались изолированными. Если между минимумами  $D_{st}$  время было меньше 24 час (multi-step storm), то оба минимума считались за одну бурю с интенсивностью, равной минимальному значению  $D_{st}$ . Таких одиночных бурь с двумя минимумами в течение 24 часов было несколько процентов. Поэтому их вклад в общую зависимость незначителен, а уровень  $D_{st}$

Таблица 1

Тип СВ	МС 10 бурь	Sheath 21 буря	CIR 31 буря	Ejecta 31 буря
$\langle c_0 \rangle$ , нТл медиана	$-13.77 \pm 14.4$ -11	$-13.1 \pm 28.8$ -18	$-28.7 \pm 30.5$ -32	$-30.7 \pm 23.1$ -32
$\langle c_E \rangle$ , нТл/МВ м <sup>-1</sup> ч медиана	$-2.55 \pm 0.75$ -2.4	$-3.2 \pm 1.6$ -3.3	$-2.82 \pm 1.1$ -2.8	$-2.3 \pm 1.0$ -2.2
$\langle c_P \rangle$ , нТл/н Па медиана	$-0.92 \pm 2.9$ 1	$0.97 \pm 3.3$ 1	$3.3 \pm 3.7$ 2.6	$2.8 \pm 3.9$ 2.8
$\langle c_B \rangle$ , безразм. медиана	$1.28 \pm 3.3$ 0	$-0.8 \pm 1.8$ -1	$-0.19 \pm 1.96$ 0	$-0.2 \pm 2.1$ 0
$\langle \text{sum} E_y \rangle$	<b>16.24 ± 9.78</b>	<b>16.4 ± 13.5</b>	<b>13.3 ± 10.4</b>	<b>15.6 ± 11.8</b>
$\langle c_E \rangle \cdot \langle \text{sum} E_y \rangle$	<b>-41.41</b>	<b>-52.5</b>	<b>-37.5</b>	<b>-35.9</b>
$\langle P_d \rangle$	<b>3.62 ± 2.27</b>	<b>5.7 ± 5.7</b>	<b>5.5 ± 3.1</b>	<b>4.3 ± 2.7</b>
$\langle c_P \rangle \cdot \langle P_d \rangle$	<b>-3.33</b>	<b>5.5</b>	<b>18.15</b>	<b>12.04</b>
$\langle sB \rangle$	<b>3.07 ± 2.4</b>	<b>5.1 ± 4.1</b>	<b>5.4 ± 3.3</b>	<b>3.6 ± 2.5</b>
$\langle c_B \rangle \cdot \langle sB \rangle$	<b>3.93</b>	<b>-4.08</b>	<b>-1.03</b>	<b>-0.72</b>

индекса от предыстории учитывается коэффициентом  $c_0$  (см. ниже).

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  $sB$  [7]:

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

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

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  $k = i$ ). Коэффициенты  $c_0$ ,  $c_E$ ,  $c_P$  и  $c_B$  оценивались стандартным методом наименьших квадратов (при этом число точек на главной фазе должно быть больше числа неизвестных, т.е.  $im > 4$ ). Коэффициенты  $c_E$ ,  $c_P$  и  $c_B$  определяют величину линейной связи  $D_{st}$  индекса с интегралом конвективного электрического поля солнечного ветра  $\text{sum} E_y$ , динамическим давлением  $P_d$  и вариациями межпланетного магнитного поля  $sB$ , а коэффициент  $c_0$  связан в основном с предысторией  $D_{st}$  индекса до начала магнитной бури, так как буря может “стартовать” с любого начального значения индекса за счет как начала новой бури на фазе восстановления предыдущей бури (уменьшение уровня относительно “нуля”), так и наличия внезапного начала бури (SSC), связанного с приходом ударной волны перед началом бури (увеличение уровня).

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 ( $\langle c_0 \rangle$ ,  $\langle c_E \rangle$ ,  $\langle c_P \rangle$ ,  $\langle c_B \rangle$ ), и для полученной версии модели делается оценка вкладов в  $D_{st}$  главной фазы от отдельных параметров СВ, входящих в соотношение (1). На основании анализа этих версий моделей для каждого типа СВ создается улучшенная версия модели за счет внесения поправок, учитывающих предысторию развития начала главной фазы магнитной бури путем построения линейной функции между средним значением  $D_{st}$  индекса по 3 точкам (первая точка главной фазы и 2 предыдущие точки) и величиной  $c_0$  [7].

Каждая из версий моделей оценивалась 2-мя параметрами (например, [12]): (1) коэффициент линейной корреляции ( $r$ ) между измеренным  $D_{st}$  и модельным  $D_{st \text{ mod}}$  (насколько хорошо модель описывает реальные вариации индекса  $D_{st}$ ); (2) среднеквадратичное отклонение ( $\sigma$ ) между измеренным значением  $D_{st}$  и вычисленным по модели  $D_{st \text{ mod}}$  (насколько сильно различаются значения модельного  $D_{st \text{ mod}}$  и измеренного  $D_{st}$ , т.е. точность моделирования).

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

**3.1. Оценка вкладов разных параметров СВ в аппроксимацию главной фазы магнитных бурь, индуцированных разными течениями СВ.** В табл. 1 для 4-х типов течений СВ (МС, Sheath, CIR, Ejecta) приведены средние и медианные значения ко-

эффицентов аппроксимации главной фазы магнитных бурь ( $\langle c_0 \rangle$ ,  $\langle c_E \rangle$ ,  $\langle c_P \rangle$ ,  $\langle c_B \rangle$ ), средних параметров СВ ( $\langle \text{sum} E_y \rangle$ ,  $\langle P_d \rangle$ ,  $\langle sB \rangle$ ) и вкладов 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. Хотя разброс индивидуальных коэффициентов достаточно большой, что видно по среднеквадратичным отклонениям величин, их средние значения близки к медианным, т.е. разброс индивидуальных значений достаточно симметричен относительно средних значений. Во всех случаях, когда среднеквадратичное отклонение превышает значение среднего (медианного), статистическая значимость соответствующего коэффициента недостаточно высока, чтобы можно было уверенно делать вывод на основе этого коэффициента, и мы указываем такие результаты в качестве возможной гипотезы, которая требует своей дальнейшей проверки.

Коэффициент  $\langle c_0 \rangle$  отрицательный для всех типов СВ (т.е. всегда “понижает”  $D_{st}$ , что естественно по определению самого начала магнитной бури и его главной фазы); коэффициент  $\langle c_0 \rangle$  меняется в  $\sim 2.4$  раза от максимальной величины для МС и Sheath (высокий уровень  $D_{st}$ , с которого начинается буря, возможно из-за SSC перед началом бури) до минимальной для CIR и Ejecta. Однако, разброс в значениях  $c_0$  (для конкретных бурь) большой и сопоставим с величиной самого среднего  $\langle c_0 \rangle$  и даже превышает его (для бурь от Sheath).

Коэффициент  $\langle c_E \rangle$  определяется тем, насколько сильно электрическое поле (параметр  $\text{sum} E_y$ ) изменяет  $D_{st}$  индекс главной фазы бурь. Коэффициент  $\langle c_E \rangle$  отрицательный и понижает величину  $D_{st}$  для всех 4-х типов бурь. Наибольшее понижение  $D_{st}$  от интегрального электрического поля у бурь от Sheath, наименьшее у бурь от Ejecta (меняется в  $\sim 1.4$  раза). Самое сильное понижение  $D_{st}$  у Sheath- бурь, которое при одной и той же величине поля приводит к более быстрому падению  $D_{st}$ , чем у остальных типов СВ.

Вклад  $E_y$  в  $D_{st}$  (т.е. величина  $\langle c_E \rangle \cdot \langle \text{sum} E_y \rangle$ ) наибольший у магнитных бурь от Sheath и наименьший у бурь от Ejecta. Максимальное различие вкладов этого члена достигает  $\sim 1.4$ , что определяется, в основном, коэффициентом  $\langle c_E \rangle$ , а не величиной  $\langle \text{sum} E_y \rangle$ .

Коэффициент  $\langle c_P \rangle$  определяет вклад динамического давления в величину  $D_{st}$  главной фазы. В среднем, величина  $\langle c_P \rangle$  меняется от минимального значения для МС-бурь (т.е. небольшое усиление бури, или понижение  $D_{st}$ ) до максимального для CIR-бурь (т.е. ослабление бури, или повышение  $D_{st}$ ). Однако большой разброс в значениях  $\langle c_P \rangle$  внутри каждого типа сопоставим и иногда превышает величину среднего  $\langle c_P \rangle$  для данного типа

бурь. Можно говорить лишь о тенденции роста  $D_{st}$  (ослабления бури) с ростом  $P_d$  для 3-х типов бурь (кроме МС).

Вклад  $P_d$  в  $D_{st}$  (т.е. величина  $\langle c_P \rangle \cdot \langle P_d \rangle$ ) максимальный для CIR- и Ejecta-бурь (сильное ослабление бури), и минимальный для Sheath-бурь (в  $\sim 2.5$ – $3.5$  раза слабее), и обратное действие (очень слабое понижение  $D_{st}$ , т.е. усиление бури) для МС-бурь. Большой положительный вклад  $\langle P_d \rangle$  в  $D_{st}$  для CIR- и Ejecta-бурь приводит к ослаблению (на 30–50%) вклада основного параметра  $\langle \text{sum} E_y \rangle$ . Возможная причина этого – более высокое давление  $\langle P_d \rangle$  внутри этих типов СВ.

Коэффициент  $\langle c_B \rangle$  определяет эффективность вклада магнитных флуктуаций  $sB$  ММП в  $D_{st}$  главной фазы. В среднем величина  $\langle c_B \rangle$  меняется незначительно для всех типов СВ, слегка понижает  $D_{st}$  и увеличивает силу Sheath-бури и немного повышает  $D_{st}$  и уменьшает силу МС-бури.

Средние значения уровня флуктуаций  $\langle sB \rangle$  соответствуют физическим условиям в типах СВ, и меняются от минимального значения для МС-бурь до максимального для бурь от областей сжатия CIR- и Sheath- бурь (т.е. почти в 2 раза выше в области сжатия, что соответствует определению данного типа течения).

Вклад уровня флуктуаций  $\langle sB \rangle$  в  $D_{st}$  мал (по сравнению с вкладом  $\langle \text{sum} E_y \rangle$ ) для всех типов бурь и зависит от типа СВ. Для Sheath-бурь он понижает  $D_{st}$ , усиливая бурю, для МС-бурь, наоборот, он увеличивает  $D_{st}$ , ослабляя бурю. Для CIR- и Ejecta- бурь магнитные флуктуации слегка усиливают бурю.

Из-за недостаточно высокой точности данные, помеченные в табл. 1 нежирным шрифтом, можно интерпретировать как: (1) для  $c_P$  среднее  $\langle c_P \rangle \approx 0$  для МС и Sheath, (2) для  $c_B$  среднее  $\langle c_B \rangle \approx 0$  для всех типов СВ. Для этих данных нужно увеличить статистику и проводить дополнительный анализ.

Таким образом, наибольшие вклады в  $D_{st}$  главной фазы дают параметры  $\langle c_0 \rangle$  (для МС в 2.4 раза выше, чем Ejecta) и интегральное электрическое поле  $\text{sum} E_y$  (для Sheath в 1.4 раза выше, чем для Ejecta), величина которых зависит от типа СВ. Вклад давления  $P_d$  наибольший для CIR- и в 1.5 раза меньше для Ejecta- бурь; для Sheath-бурь вклад  $P_d$  в 3.3 раза слабее, по сравнению с CIR-бурями. Если для Ejecta вклад  $P_d$  ослабляет бурю (положительный коэффициент  $c_P$ ), то для МС вклад давления усиливает бурю (отрицательный коэффициент  $c_P$ ). Для всех типов СВ вклад уровня магнитных флуктуаций  $sB$  ММП в  $D_{st}$  главной фазы незначителен, по сравнению с основным вкладом от  $\text{sum} E_y$ , и его величина, предположи-

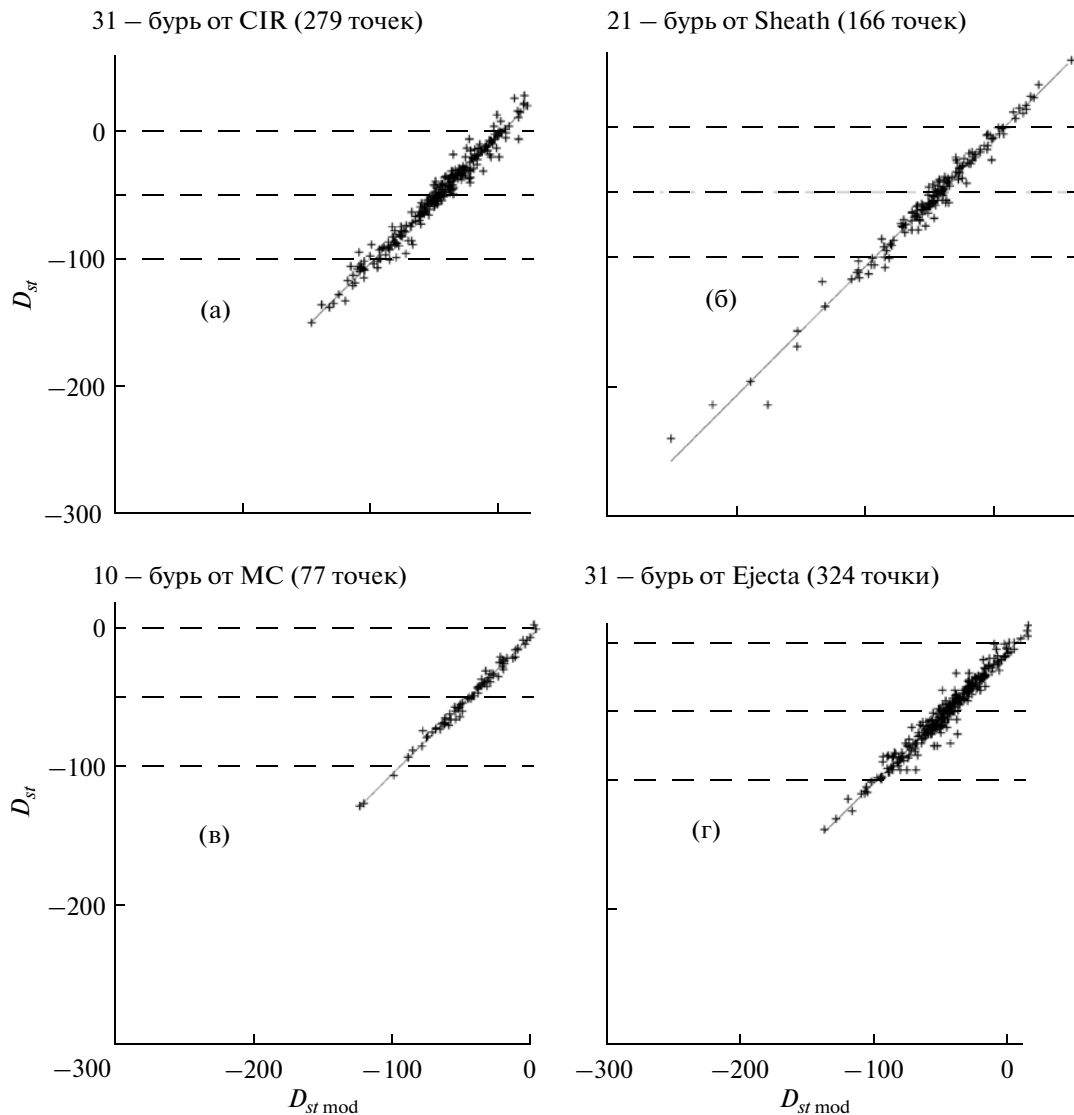


Рис. 1

тельно, зависит от типа СВ. Для MC-бурь флуктуации ММП приводят к небольшому повышению  $D_{st}$  фазы (ослабление бури), которое почти компенсируется небольшим понижением  $D_{st}$  (усиление бури) из-за вклада давления  $P_d$ . Напротив, для Sheath-бурь флуктуации  $sB$  ММП приводят к небольшому понижению  $D_{st}$  (усиление бури), которое тоже почти компенсируется небольшим повышением  $D_{st}$  (ослабление бури) из-за вклада давления  $P_d$ .

**3.2. Сравнение 3-х версий моделей главной фазы магнитных бурь, индуцированных 4-мя типами течения СВ.** Зависимость  $D_{st}$  индекса, измеренного на главной фазе, от модельного значения  $D_{st mod}$ , посчитанного по индивидуальным коэффициентам аппроксимаций для каждой бури и для 4-х типов СВ показана на рис. 1: (а) CIR;

(б) Sheath, (в) MC, (г) Ejecta. Коэффициенты корреляции ( $r$ ) и среднеквадратичные отклонения ( $\sigma$ ) и линии регрессии  $D_{st}$  от  $D_{st mod}$  для 3-х версий моделей приведены в табл. 2. В 1-м столбце на 3-х нижних строках указаны версии моделей: (1в) – модель с индивидуальными коэффициентами, (2в) – модель с усредненными коэффициентами, и (3в) – улучшенная модель. Для модели с индивидуальными коэффициентами аппроксимации (1в) для всех 4-х типов СВ коэффициент корреляции между  $D_{st}$  и  $D_{st mod}$  очень высокий и составляет значения  $r = 0.98$  для CIR- и Ejecta-бурь и  $r = 0.99$  для MC- и Sheath-бурь. Среднеквадратичное отклонение самое низкое у MC-бурь, в  $\sim 2$  раза выше у CIR - и Ejecta-бурь, и самое высокое у Sheath - бурь (различие в 2.3 раза). Как и следовало ожидать, индивидуальные коэффициенты, полученные из аппроксимации для конкретной отдель-

Таблица 2

Тип СВ \ Знач. параметр	МС 10 бурь 77 точек	Sheath 21 буря 116 точки	CIR 31 буря 279 точки	Ejecta 31 буря 324 точки
$c_0$ от $(ave D_{st})$	$Y = 0.69 \cdot X - 6.51$	$Y = 0.26 \cdot X - 9.8$	$Y = 0.33 \cdot X - 26.15$	$Y = 0.4 \cdot X - 24.5$
$r$	0.730	0.239	0.233	0.292
(3в) $D_{st}$ от $(D_{st\_mod})$	$Y = 0.9 \cdot X + 0.84$	$Y = 0.8 \cdot X - 2.55$	$Y = 0.9 \cdot X - 6.5$	$Y = 0.7 \cdot X - 12.6$
$\sigma$	15.64	23.4	17.8	16.5
$r$	0.832	0.837	0.846	0.810
(2в) $D_{st}$ от $(D_{st\_mod})$	$Y = 0.68 \cdot X - 9.96$	$Y = 0.8 \cdot X - 3.5$	$Y = 0.9 \cdot X - 6.6$	$Y = 0.7 \cdot X - 12.6$
$\sigma$	21.74	26.2	20.1	18.4
$r$	0.648	0.804	0.803	0.758
(1в) $D_{st}$ от $(D_{st\_mod})$	$Y = 1.0 \cdot X + 2.445$	$Y = 1 \cdot X - 4 \cdot 10^{-8}$	$Y = 1.0 \cdot X - 5 \cdot 10^{-7}$	$Y = 1 \cdot X - 4.5 \cdot 10^{-6}$
$\sigma$	2.6	6.06	5.5	5.2
$r$	0.994	0.988	0.984	0.978

ной бури, дают наилучший результат для моделирования главной фазы бурь с любым типом источника в СВ. Различные типы бурь отличаются только значениями коэффициентов корреляции и  $\sigma$ . Точнее всего данная версия модели описывает главную фазу МС-бурь [7], но ее точность в 2–2.3 раза ниже для бурь от Ejecta и от Sheath.

На рис. 2 показано то же, что на предыдущем рис. 1, но модельные расчеты  $D_{st\_mod}$  сделаны по значениям коэффициентов аппроксимаций  $\langle c_0 \rangle$ ,  $\langle c_E \rangle$ ,  $\langle c_P \rangle$ ,  $\langle c_B \rangle$ , усредненным по типу СВ (см. табл. 1). Для данной версии модели (2в) коэффициент корреляции между измеренным  $D_{st}$  значением на главной фазе и модельным  $D_{st\_mod}$  и точность модели существенно уменьшается для всех типов СВ. Самый высокий коэффициент корреляции у бурь от Sheath и от CIR, самый низкий коэффициент корреляции у МС-бурь (различие в ~1.23 раза). Промежуточное значение имеют Ejecta-бури. Самая высокая точность модели (низкое  $\sigma$ ) для Ejecta-бурь. Самая низкая точность у бурь от Sheath и у бурь от МС (т.е. понижение точности в 1.4–1.2 раза по сравнению с Ejecta). По сравнению с предыдущей версией модели (с использованием индивидуальных коэффициентов) ухудшение точности для данных типов СВ в ~4–8 раз.

Для повышения точности моделирования главной фазы мы внесли поправки, учитывающие предысторию развития начала главной фазы магнитной бури [7]. 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 зависимости коэффициента  $c_0(j)$  от средней величины  $ave D_{st}(j)$ . Данная улучшенная версия модели имеет вид:

$$D_{st\_mod}(i) = c_0(j) + \langle c_E \rangle \cdot \text{sum} E_y(i) + \langle c_P \rangle \cdot P_d(i) + \langle c_B \rangle \cdot sB(i), i - \text{точка фазы};$$

где  $c_0(j) = a \cdot ave D_{st}(j) + b$ , (здесь величина  $ave D_{st}(j)$  – для бури  $j$  данного типа СВ среднее значение  $D_{st}$  по 3-м точкам, включающим 2 точки до начала бури и первую точку главной фазы бури;  $a, b$  – коэффициенты аппроксимации зависимости  $c_0(j)$  от  $ave D_{st}(j)$ ; остальные коэффициенты  $\langle c_E \rangle$ ,  $\langle c_P \rangle$ ,  $\langle c_B \rangle$ , как и прежде, взяты из усреднений по всем бурям данного типа СВ). Оценки возможной связи коэффициентов  $c_0(j)$  с усредненной величиной  $D_{st}$  по 3 точкам  $ave D_{st}(j)$ , т.е. коэффициенты корреляции между ними, и коэффициенты аппроксимаций “ $a, b$ ” представлены в табл. 2 в верхней строке. Для 10 МС-бурь между этими параметрами наблюдается линейная зависимость  $c_0 = 0.69 \cdot ave D_{st} - 6.51$ , с коэффициентом корреляции 0.73.

На рис. 3 для 4-х типов бурь показана зависимость  $D_{st}$  от  $D_{st\_mod}$  для улучшенной версии модели  $D_{st\_mod}$ , когда вместо постоянного среднего значения  $\langle c_0 \rangle$ , для каждой бури  $j$  взяты значения  $c_0(j)$ , рассчитанные из указанной выше линейной зависимости коэффициента  $c_0(j)$  от  $ave D_{st}(j)$ . Видно, что данная версия модели (3в) лучше описывает наши экспериментальные данные, чем версия с усредненными коэффициентами (2в). Самый высокий коэффициент корреляции у бурь CIR, несколько ниже у бурь от Sheath и от МС. Самый низкий коэффициент корреляции у бурь от Ejecta (различие между значениями  $r$  всего ~1.05). Самое низкое значение среднеквадратичного отклонения имеют бури от МС, самое высокое среднеквадратичное отклонение у бурь от Sheath (различаются почти в 1.5 раза). Бури от МС и Ejecta имеют близкие значения  $\sigma$ .

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ

Таким образом, нами предложена и протестирована модель для описания главной фазы маг-

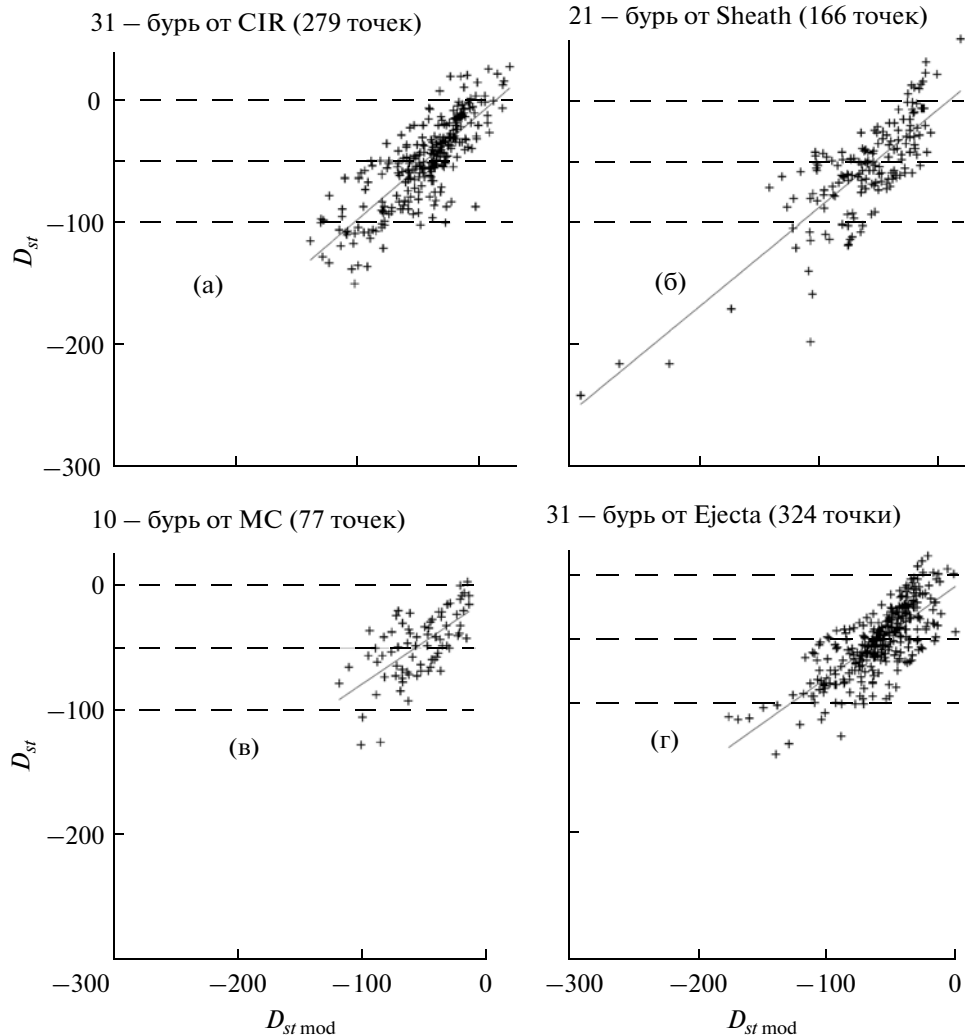


Рис. 2

нитных бурь, индуцированных 4-мя типами СВ (MC – 10 бурь, CIR – 31 буря, Sheath – 21 буря, Ejecta – 31 буря), которая основана на предположении о линейной зависимости  $D_{st}$  главной фазы от интегрального электрического поля  $\text{sum}E_y$ , динамического давления  $P_d$ , и уровня флуктуаций  $sB$  ММП.

Анализ результатов показывает, что основной вклад в  $D_{st}$  индекс главной фазы дает интегральное электрическое поле  $\text{sum}E_y$ , которое для всех типов СВ понижает величину  $D_{st}$  (усиливает бурю), и величина понижения зависит от типа источника бури в СВ. Причем наиболее сильная зависимость  $D_{st}$  индекса от интегрального электрического поля наблюдается у бурь от Sheath, что указывает на более высокую эффективность (т.е. способность приводить к более сильной интенсивности магнитных бурь  $D_{st \min}$ ) по сравнению с другими типами бурь. Подтверждением этому яв-

ляется сама выборка бурь от Sheath, для которой интенсивность магнитной бури в минимуме достигает значений  $D_{st \min} \sim -250$  нТл (супер-сильные бури), в то время как для остальных типов СВ величина  $D_{st \min}$  магнитных бурь меняется в более узком диапазоне (от  $-50$  до  $-150$  нТл). Более высокая интенсивность бурь, генерированных Sheath, ранее качественно отмечалась в работах [3, 35, 36, 39, 41, 47, 55–58]. Однако в данной работе мы впервые приводим численное сравнение вкладов (коэффициентов  $\langle c_E \rangle$ ) для разных межпланетных источников бурь.

Вклад динамического давления в  $D_{st}$  главной фазы также зависит от типа бурь. В частности, для 2-х типов бурь от MC и от Sheath вклад  $P_d$  почти на порядок меньше, чем основной вклад в  $D_{st}$  от  $\text{sum}E_y$ , и поэтому слабо влияет на  $D_{st}$  главной фазы (около 10%). В то время как для 2-х типов бурь от

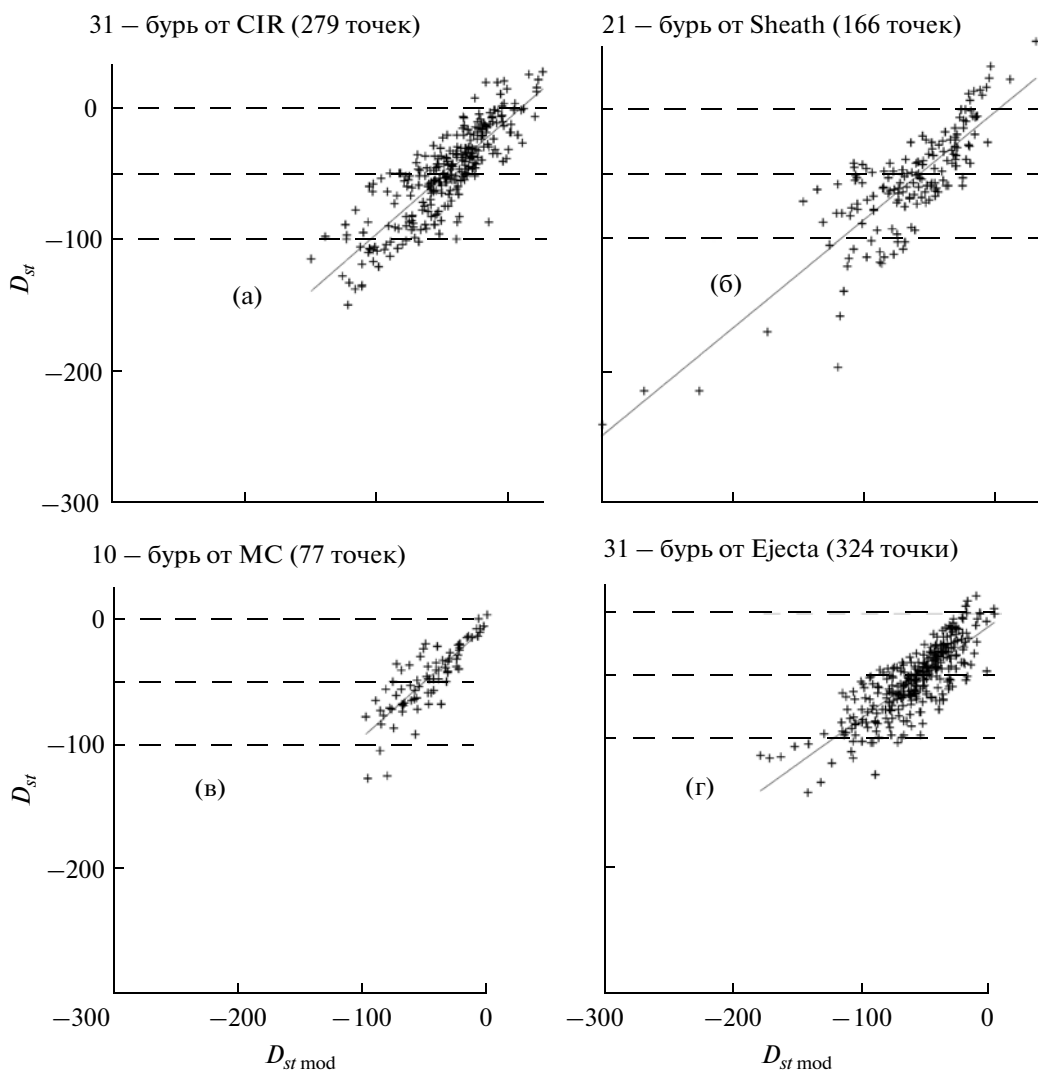


Рис. 3

CIR и от Ejecta давление  $P_d$  ослабляет главную фазу бури на 30–50%.

Вклад уровня флуктуаций  $sB$  ММП в  $D_{st}$  главной фазы невелик по сравнению с вкладом  $\text{sum}E_y$ , и также зависит от типа источника бури. Например, для бурь от CIR и от Ejecta он минимальный, и почти не влияет на  $D_{st}$  главной фазы (усиление бури на 3%); для бурь от Sheath он максимальный (в  $\sim 4$  раза выше, чем для CIR- и Ejecta- бурь), и приводит к ( $\sim 10\%$ ) понижению  $D_{st}$  фазы (усиление бури).

Улучшенная версия модели с коэффициентом  $c_0$ , полученным из зависимости  $c_0$  от  $D_{st}$  значений в предшествующие моменты времени перед началом бури, характеризуется более высокими значениями коэффициента корреляции между измеренным  $D_{st}$  и  $D_{st \text{ mod}}$  для Ejecta и CIR, и более низким среднеквадратичным отклонением для MC и

Sheath, что существенно лучше, чем для версии модели с усредненными коэффициентами аппроксимации.

Представляет интерес сравнить наши результаты, полученные с помощью улучшенной модели, с результатами моделирования  $D_{st}$  индекса магнитных бурь, разделенных по типу СВ, представленными в других работах. Отметим, что тестирование разных моделей должно проводиться на независимом наборе данных, отличном от набора данных, используемом для оптимизации этих моделей. В табл. 3 представлены коэффициенты корреляции ( $r$ ) и среднеквадратичные отклонения для 4-х типов СВ и 7-ти моделей, включающих 6 моделей из работы [32] (которые тестировались на наборе данных, отличающегося от нашего, см. введение) и нашу улучшенную модель (3в) с учетом предыстории развития  $D_{st}$  перед началом главной фазы.



Таблица 3

Модели	MC		Sheath		CIR		Ejecta		Ссылки
	$r$	$\sigma$	$r$	$\sigma$	$r$	$\sigma$	$r$	$\sigma$	
Зв	0.83	15.6	0.84	23.4	0.85	17.8	0.81	16.5	
В модель	0.89	51.4	0.71	56.1	0.77	48.2	0.88	39.2	[8]
FL модель	0.83	51.7	0.66	50.0	0.66	39.9	0.81	34.2	[13]
OM модель	0.9	26.5	0.8	27.6	0.87	19.0	0.9	20.2	[14]
W модель	0.91	22.4	0.81	25.4	0.87	16.2	0.92	15.3	[16]
TL модель	0.94	18.5	0.92	12.5	0.95	11.8	0.94	11.8	[27, 28]
NM модель	0.88	24.1	0.82	26.4	0.87	19.5	0.89	19.6	[31]

Наша улучшенная версия модели (Зв) достаточно хорошо описывает главную фазу бурь для всех типов СВ. Величина коэффициента корреляции ( $r$ ) и точность модели ( $\sigma$ ) зависят от типа СВ. Для отдельных типов СВ наша модель может быть лучше, многих других, для некоторых типов, наоборот, хуже других моделей. Например, по величине коэффициента корреляции наша модель: (1) для Sheath-бурь она лучше всех моделей, кроме TL модели [27, 28]; (2) для MC- и Ejecta-бурь она совпадает с FL моделью [13], специально предназначенной для MC-бурь, но хуже всех остальных, включая В модель [8]; (3) для CIR-бурь она лучше, чем В модель и FL модель [8, 13], но хуже 4-х остальных моделей [14, 16, 31, 27, 28]. Аналогично по точности ( $\sigma$ , нТл) наша улучшенная модель: (1) для MC-бурь лучше всех моделей (включая TL модель [27, 28]), в 3 раза точнее, чем В модель и FL модель [8, 13]; (2) для Sheath-бурь она лучше всех моделей, кроме TL модели (которая в 2 раза точнее нее) [27, 28], и в 2–2.5 раза точнее, чем В модель и FL модель [8, 13]; (3) для CIR-бурь она лучше всех моделей, кроме TL модели [27, 28], в 2.2–2.7 раза точнее, чем В модель и FL модель [8, 13], но в 1.5 раза хуже, чем TL модель [27, 28]; (4) для Ejecta-бурь лучше 4-х моделей, но хуже, чем W модель и TL модель [16, 27, 28] (которая в 1.4 раза точнее нее), в 2–2.4 раза точнее, чем В модель и FL модель [8, 13].

Таким образом, результаты расчетов улучшенной версии модели (с поправкой на начало бури), согласуются с экспериментальными данными и не уступают по качеству результатам моделирования других авторов.

## ВЫВОДЫ

Моделирование главной фазы 93-х магнитных бурь ( $-250 < D_{st} \leq -50$  нТл) для 4-х типов СВ в предположении линейной зависимости  $D_{st}$  от параметров  $\text{sum}E_y$ ,  $P_d$  и  $sB$  ММП, показало, что вклад каждого параметра СВ в  $D_{st}$ , а также коэффициент корреляции и точность полученной мо-

дели, в среднем, зависят от типа источника бурь в СВ. Однако статистическая значимость коэффициентов для  $P_d$  и  $sB$  ММП для некоторых типов СВ требует дальнейшей проверки.

Моделирование главной фазы бури выполнено в 3-х вариантах: (1) по индивидуальным коэффициентам аппроксимаций; (2) по усредненным коэффициентам аппроксимаций; и (3) по усредненным коэффициентам аппроксимаций, как в случае (2), но с учетом предыстории развития начала главной фазы. Результаты анализа показывают:

1) Для всех типов СВ версия модели с индивидуальными коэффициентами аппроксимации является самой точной и лучше всего описывает вариации для  $D_{st}$  главной фазы, по сравнению с другими моделями. Ее точность зависит от типа СВ: самая высокая точность у бурь от MC, самая низкая у бурь от Sheath (в 2.3 раза), и в 2 раза ниже точность у бурь от Ejecta и CIR.

2) Наибольший вклад в  $D_{st}$  главной фазы бурь от разных типов СВ дает интегральное электрическое поле  $\text{sum}E_y$ , причем для бурь от Sheath он выше (в 1.4 раза), что связано с большей эффективностью этих межпланетных источников бурь по отношению к другим типам СВ.

3) Вклад динамического давления  $P_d$  в  $D_{st}$  главной фазы также зависит от типа СВ: самый низкий у MC- и Sheath-бурь, и выше у CIR- и Ejecta-бурь (ослабляет  $D_{st}$  бурь на 30–50%).

4) Вклад флуктуаций  $sB$  ММП мал для всех типов СВ, но его величина также зависит от типа СВ.

5) Улучшенная версия модели (с поправкой на начало бури) является наилучшей для описания развития главной фазы бури для всех типов СВ, как для описания вариаций  $D_{st}$ , так и по точности. Коэффициент корреляции меняется в диапазоне от  $r = 0.81$  для бурь от Ejecta и до  $r = 0.85$  для бурь от CIR; самая высокая точность у MC-бурь (15.6 нТл), и самая низкая точность (в 1.5 раза хуже) у Sheath-бурь.

б) Сравнение с 6-ю моделями [8, 13, 14, 16, 27, 28, 31] из работы [32] показывает, что наша улучшенная версия модели для MC- и Ejecta-бурь такая же хорошая (по коэффициенту корреляции), как FL модель [13] (но уступает остальным моделям [8, 14, 16, 27, 28, 31]), а для Sheath-бурь она превосходит почти все модели, кроме TL модели [27, 28]; для CIR-бурь ее эффективность выше, чем FL модель и W модель [8, 13]. По точности наша улучшенная модель: для MC-бурь превосходит все модели, включая TL модель [27, 28]; для Sheath-бурь уступает только TL модель [27, 28], но точнее 5-ти остальных [8, 13, 14, 16, 31]; для Ejecta- и CIR-бурь уступает только TL и W моделям [16, 27, 28], но лучше 4-х остальных [8, 13, 14, 31].

Таким образом, показано, что вклады основных параметров СВ в  $D_{st}$  главной фазы, коэффициент корреляции между измеренным  $D_{st}$  и модельным  $D_{st\ mod}$ , и точность разных версий моделей зависят от типа СВ. Полученные результаты согласуются с более ранними выводами и количественно подтверждают их (например, [3, 47]). Каждый из типов СВ выделялся нами на основании определенных физических критериев, с разными величинами параметров СВ [51]. Кроме того, в нашей выборке бурь с разным типом СВ очень сильные бури ( $-250 < D_{st\ min} < -150$  нТл) присутствуют только в выборке бурь от Sheath. Тем не менее, полученная нами модель (улучшенная версия модели) главной фазы для разных типов СВ достаточно успешно конкурирует с другими моделями, как по описанию реальных вариаций  $D_{st}$ , так и по точности ([32] и ссылки в ней). Различные коэффициенты модели, полученные для разных межпланетных источников, позволят более точно прогнозировать магнитные бури при анализе в реальном времени параметров межпланетной среды, измеренные на космических аппаратах типа *Wind* или *ACE* [7].

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 № 10-02-00277а, 13-02-00158а, а также Программой Президиума РАН № П 22.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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).
2. 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).
3. 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.
4. 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.
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. 2. Главная фаза бури // Геомагнетизм и аэронаука. 2012. Т. 52. № 1. С. 42–53.
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. 3. Развитие 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 4. Моделирование для магнитных облаков // Геомагнетизм и аэронаука. 2013. № 6.
8. 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.
9. Kane R.P. Severe geomagnetic storms and Forbush decreases: interplanetary relationships reexamined // Ann. Geophys. 2010. V. 28. P. 479–489.
10. Ontiveros V. Geomagnetic Storms caused by shocks and ICMEs // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. A10244. doi:10.1029/2010JA015471.
11. Weigel R.S. Solar wind density influence on geomagnetic storm intensity // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. A09201. doi:10.1029/2009JA015062.
12. Feldstein Y.I. Modelling of the Magnetic Field of Magnetospheric Ring Current as a Function of Interplanetary Parameters // Space Sci. Revs. 1992. V. 59. P. 83–165.
13. Fenrich F.R., Luhmann J.G. Geomagnetic response to magnetic clouds of different polarity // Geophys. Res. Lett. 1998. V. 25. P. 2999–3002.
14. 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.
15. O'Brien T.P., McPherron R.L. Forecasting the ring current index Dst in real time // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2000. V. 62. P. 1295–1299.
16. 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.
17. Mal'tsev Y.P. Points of controversy in the study of magnetic storms // Space Science Reviews. 2004. V. 110. P. 227–267.
18. Siscoe G., McPherron R.L., Liemohn M.W., Ridley A.J., Lu G. Reconciling prediction algorithms for  $D_{st}$  //

- J. Geophys. Res. 2005. V. 110. P. A02215. doi:10.1029/2004JA010465.
19. 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.
  20. Vassiliadis D., Klimas A.J., Baker D.N., Roberts D.A. A description of solar wind-magnetosphere coupling based on nonlinear filters // J. Geophys. Res. 1995. V. 100. № A3. P. 3495–3512.
  21. Vassiliadis D., Klimas A.J., Baker D.N. Models of Dst Geomagnetic Activity and of its Coupling to Solar Wind Parameters // Phys. Chem. Earth (C). 1999. V. 24. № 1–3. P. 107–112.
  22. Vassiliadis D., Klimas A.J., Valdivia J.A., Baker D.N. The Dst geomagnetic response as a function of storm phase and amplitude and the solar wind electric field // J. Geophys. Res. 1999. V. 104. № A11. P. 24957–24976.
  23. Klimas A.J., Vassiliadis D., Baker D.N., Roberts D.A. The organized nonlinear dynamics of the magnetosphere // J. Geophys. Res. 1996. V. 101. P. 13089–13113.
  24. Klimas A.J., Vassiliadis D., Baker D.N. Dst index prediction using data-derived analogues of the magnetospheric dynamics // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. P. 20435–20447.
  25. Wu J.-G., Lundstedt H. Neural network modeling of solar wind–magnetosphere interaction // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. № A7. P. 14457–14466.
  26. McPherron R.L., O'Brien T.P. Predicting geomagnetic activity: The Dst index // Space Weather. Geophys. Monogr. Ser. / Edited by P. Song, Singer H.J., Siscoe G.L. AGU. Washington. D.C. 2001. V. 125. P. 339–345.
  27. Temerin M., Li X. A new model for the prediction of Dst on the basis of the solar wind // J. Geophys. Res. 2002. V. 107. № A12. P. 1472. doi:10.1029/2001JA007532.
  28. Temerin M., Li X. Dst model for 1995–2002 // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. A04221. doi:10.1029/2005JA011257.
  29. Sharifi J., Araabi B.N., Lucas C. Multi-step prediction of Dst index using singular spectrum analysis and locally linear neurofuzzy modeling // Earth Planets Space. 2006. V. 58. P. 331–341.
  30. Amata E., Pallochia G., Consolini G. et al. Comparison between three algorithms for Dst predictions over the 2003–2005 period // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2008. V. 70. P. 496–502.
  31. Boynton R.J., Balikhin M.A., Billings S.A. et al. Data derived NARMAX Dst model // Ann. Geophys. 2011. V. 29. P. 965–971.
  32. Ji E.-Y., Moon Y.-J., Gopalswamy N., Lee D.-H. Comparison of Dst forecast models for intense geomagnetic storms // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. A03209. doi:10.1029/2011JA016872.
  33. 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.
  34. 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.
  35. Huttunen K.E.J., Koskinen H.E.J., Karinen A., Mursula K. Asymmetric Development of Magnetospheric Storms during Magnetic Clouds and Sheath Regions // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33. P. L06107. doi:10.1029/2005GL024894.
  36. 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.
  37. Plotnikov I.Ya., Barkova E.S. Nonlinear Dependence of Dst and AE Indices on the Electric Field of Magnetic Clouds // Adv. Space Res. 2007. V. 40. P. 1858–1862.
  38. Longden N., Denton M.H., Honary F. Particle Precipitation during ICME-Driven and CIR-Driven Geomagnetic Storms // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. P. A06205. doi:10.1029/2007JA012752.
  39. 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.
  40. 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.
  41. Guo J., Feng X., Emery B.A. et al. Energy transfer during intense geomagnetic storms driven by interplanetary coronal mass ejections and their sheath regions // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. A05106. doi:10.1029/2011JA016490.
  42. Tsurutani B.T., Lakhina G.S., Pickett J.S. et al. Nonlinear Alfvén's waves, discontinuities, proton perpendicular acceleration, and magnetic holes/decreases in interplanetary space and the magnetosphere: Intermediate shocks? // Nonlinear Proc. Geophys. 2005. V. 12. P. 321.
  43. Jordanova V.K. Modeling the behavior of corotating interaction region driven storms in a comparison with coronal mass ejection driven storms // In Recurrent magnetic storms: corotating solar wind streams / Eds B.T. Tsurutani, R.L. McPherron, W.D. Gonzalez, G. Lu, J.H.A. Sobral & N. Gopalswamy // Geophysical Monograph Series, Washington. D.C: AGU. V. 2006. V. 167. P. 319–340.
  44. Liemohn M.W., Jazowski M. Ring current simulations of the 90 intense storms during solar cycle 23 // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. P. A00A17. doi:10.1029/2008JA013466.
  45. Liemohn M.W., Jazowski M., Kozyra J.U. et al. CIR versus CME drivers of the ring current during intense magnetic storms // Proc. R. Soc. A. 2010. V. 466. P. 3305–3328. doi:10.1098/rspa.2010.0075.
  46. Cerrato Y., Saiz E., Cid C. et al. Solar and interplanetary triggers of the largest Dst variations of the solar cycle 23 // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2012. V. 80. P. 111–123.
  47. 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.
48. *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.
49. *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.
50. *King J.H., Papitashvili N.E.* Solar Wind Spatial Scales in and Comparisons of Hourly Wind and ACE Plasma and Magnetic Field Data // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 110. № A2. P. A02209. doi: 10.1029/2004JA010804.
51. *Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г., Ермолаев М.Ю.* Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976–2000 гг. // *Космич. исслед.* 2009. № 2. P. 99–113. (Cosmic Research. P. 81).
52. *Garcia H.A., Dryer M.* The solar flares on February 1986 and the ensuing intense geomagnetic storm // *Solar Phys.* 1987. V. 109. P. 119–137.
53. *Tsurutani B.T., Gonzalez W.D., Tang F., Lee E.T.* Great magnetic storms // *Geophys. Res. Lett.* 1992. V. 19. № 1. P. 73–76.
54. *Eselevich V.G., Fainshtein V.G.* An Investigation of the Relationship between the Magnetic Storm Dst-index and Different Types of Solar Wind Streams // *Annales Geophysicae.* 1993. V. 11. № 8. P. 678–684.
55. *Huttunen K.E.J., Koskinen H.E.J.* Importance of post-shock streams and sheath region as drivers of intense magnetospheric storms and high-latitude activity // *Annales Geophysicae.* 2004. V. 22. P. 1729–1738.
56. *Ермолаев Ю.И., Ермолаев М.Ю., Лодкина И.Г., Николаева Н.С.* Статистическое исследование гелиосферных условий, приводящих к магнитным бурям // *Космич. исслед.* 2007. Т. 45. № 1. С. 3. (Cosmic Research. P. 1).
57. *Ермолаев Ю.И., Ермолаев М.Ю., Лодкина И.Г., Николаева Н.С.* Статистическое исследование гелиосферных условий, приводящих к магнитным бурям. 2 // *Космич. исслед.* 2007. Т. 45. № 6. С. 489. (Cosmic Research. P. 461).
58. *Yermolaev Y.I., Yermolaev M.Y., Nikolaeva N.S., Lodkina L.G.* Interplanetary conditions for CIR-induced and MC-induced geomagnetic storms // *Bulg. J. Phys.* 2007. V. 34. P. 128–135.