

ЗАВИСИМОСТЬ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ ВО ВРЕМЯ МАГНИТНЫХ БУРЬ ОТ ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА ДЛЯ РАЗНЫХ ТИПОВ ТЕЧЕНИЙ.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ МАГНИТНЫХ ОБЛАКОВ

© 2014 г. Н. С. Николаева, Ю. И. Ермолаев, И. Г. Лодкина

Институт космических исследований (ИКИ) РАН, г. Москва

e-mail: nnikolae@iki.rssi.ru

Поступила в редакцию 29.06.2012 г.

После доработки 11.03.2013 г.

В работе проверяется возможность аппроксимации главной фазы магнитных бурь ($Dst \leq -50$ нТл), генерированных магнитными облаками (МС), линейной зависимостью от параметров солнечного ветра: интегрального электрического поля $\sum E_y$, динамического давления Pd , и уровня флуктуаций поля σB . Результаты показывают, что главная фаза магнитной бури от МС лучше всего описывается моделью с индивидуальными значениями коэффициентов аппроксимации главной фазы: коэффициент корреляции 0.99 между измеренным и модельным значением Dst и среднеквадратичное отклонение 2.6 нТл. Версия модели с усредненными коэффициентами по всем МС-бурям намного хуже описывает главную фазу: коэффициент корреляции 0.65 и среднеквадратичное отклонение 21.7 нТл. Более точная версия модели главной фазы МС-бурь получена после внесения поправок, учитывающих предысторию развития начала главной фазы магнитной бури: коэффициент корреляции 0.83 и среднее квадратичное отклонение 15.6 нТл. На примере отдельных магнитных бурь от МС демонстрируются результаты предсказания Dst на главной фазе с использованием предложенной нами методики моделирования.

DOI: 10.7868/S001679401402014X

1. ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа является продолжением серии статей [Николаева и др., 2011, 2012а, б], посвященных исследованию процесса генерации магнитных бурь разными типами течений солнечного ветра. На основе данных базы OMNI для интервала 1976–2000 гг. нами были идентифицированы крупномасштабные типы солнечного ветра (см. “Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра” по адресу <ftp://ftp.iki.rssi.ru/pub/omni/> и статью [Ермолаев и др., 2009]). Все умеренные и сильные магнитные бури с $Dst \leq -50$ нТл, зарегистрированные за период 1976–2000 гг., были разделены на 8 групп в зависимости от того, каким типом течения они вызывались. Вопросы частоты появления различных типов солнечного ветра и вероятности возбуждения ими магнитных бурь обсуждаются в работе [Yermolaev et al., 2012].

Ранее нами было показано [Ермолаев и др., 2010, 2011; Yermolaev et al., 2010], [Николаева и др., 2011, 2012а, б]: (1) линейный характер зависимости Dst от $\sum E_y$ в среднем наблюдается для всех типов солнечного ветра; коэффициенты корреляции меняются в диапазоне от $r = -0.66$ (для МС и CIR) до $r = -0.78$ (для $Sh_{MC} + Sh_E$), что немного ниже значений, полученных ранее между “пико-

выми” значениями Dst и E_y (0.65 для CIR, 0.86 для МС и 0.7 для $Sh_{MC} + Sh_E$); (2) для 4-х типов магнитных бурь, связанных, в основном, с областями сжатия (CIR, Sh_E , $Sh_E + Sh_{MC}$, IND), интенсивность магнитной бури сильнее растет (Dst понижается) в подгруппе точек главной фазы с высоким динамическим давлением; (3) на фоне зависимости Dst от $\sum E_y$ на главной фазе магнитных бурь почти для всех типов течений наблюдается очень слабая зависимость от уровня флуктуаций σB ММП.

Отметим, что линейный характер зависимости Dst от интеграла E_y является следствием формулы [Burton et al., 1975] в случае пренебрежения на главной фазе бури членом, связанным с распадом. Этот результат был подтвержден в ряде экспериментальных работ (без селекции магнитных бурь по типу их источника в солнечном ветре) (см. работы [Kane, 2010; Ontiveros et al., 2010; Weigel, 2010] и ссылки в них). В нашем моделировании ключевую роль играет линейная связь между Dst и интегралом E_y , а зависимости от давления и вариаций поля считаются малыми. Такой подход, с одной стороны, позволяет нам выполнить количественное сравнение связи Dst и межпланетных условий для различных типов солнечного ветра, а с другой стороны, позволит построить прогно-

стическую схему для предсказания временного профиля и величины магнитных бурь.

В литературе существует большое число работ, посвященных моделированию магнитных бурь и их предсказанию (см. например, [Feldstein, 1992; Wang et al., 2003; Maltsev, 2004] и ссылки в них). Наиболее часто используются модели, основанные на дифференциальном уравнении 1-го порядка (последовали за работой [Burton et al., 1975]) (см. например, [Fenrich and Luhmann, 1998; O'Brien and McPherron, 2000a, b; Siscoe et al., 2005; Wang et al., 2003; Podladchikova and Petrukovich, 2012] и ссылки в них). Для предсказания Dst индекса используются также статистические модели, основанные на методике фильтрации, когда система солнечный ветер–магнитосфера рассматривается, как “черный ящик”, искусственные нейронные сети, нелинейные авто-регрессионные схемы (см. например, [Vassilidiadis et al., 1999; Klimas et al., 1998; Wu and Lunstedt 1997; McPherron and O'Brien, 2001; Temerin and Li, 2002, 2006; Sharifi et al., 2006; Amata et al., 2008; Boyn-ton et al., 2011]). В большинстве работ не принимается во внимание тот факт, что бури были генерированы различными типами солнечного ветра, хотя имеются работы, которые показывают, что различные типы течений СВ приводят к разным возмущениям магнитосферы (см. например, [Borovsky and Denton, 2006; Denton et al., 2006; Huttunen et al., 2006; Pulkkinen et al., 2007; Plotnikov and Barkova, 2007; Longden et al., 2008; Turner et al., 2009; Despirak et al., 2011; Guo et al., 2011; Liemohn et al., 2010; Cerrato et al., 2012]).

В работе [Ji et al., 2012] проводится сравнение 6-ти разных моделей, предсказывающих величину Dst -индекса [Burton et al., 1975; Fenrich and Luhmann, 1998; O'Brien and McPherron, 2000a; Wang et al., 2003; Temerin and Li, 2002, 2006; Boyn-ton et al., 2011]. Эффективность предсказания оценивается по 4-м параметрам: коэффициент линейной корреляции CC , RMS-ошибка, разница в величине минимального Dst -индекса ΔDst_{min} , и в моменте времени минимального Dst_{min} индекса Δt_{Dst} . Авторы [Ji et al., 2012] нашли, что наилучшее предсказание, как для 139 магнитных бурь с $Dst \leq -50$ нТл, так и для 63 сильных бурь с $Dst \leq -100$ нТл за период 2003–2010 гг., дает модель [Temerin and Li, 2002; 2006]. (В частности, для всех 63-х сильных магнитных бурь модель дает средние значения: линейного коэффициента корреляции $CC = 0.94$, RMS-ошибка = 14.8 нТл, разницы в величине минимального Dst , $\Delta Dst_{min} = 7.7$ нТл, и в моменте времени минимального Dst_{min} , $\Delta t_{Dst} = 1.5$ час.) Кроме того, авторы [Ji et al., 2012] разделили 63 сильные бури на 4 группы в соответствии с межпланетной структурой источника в солнечном ветре: 27 sMC-бурь (бури от MC с предшествующей ему быстрой ударной вол-

ной), 18 SH событий (бури от области сжатия Sheath), 8 CIR событий (бури от CIR), 10 nonMC событий (бури от Ejecta). Они показали, что модель [Temerin and Li, 2002; 2006] лучше всего описывает все типы межпланетных структур, которые вызывали магнитные бури.

Моделирование [Tsyganenko and Sitnov, 2005] показывает, что во время главной фазы очень сильных геомагнитных бурь, на Dst индекс влияет не только симметричный кольцевой ток, но и другие токовые системы: асимметричный (частичный) кольцевой ток, ток ближнего хвоста, продольные токи, связывающие магнитосферу с высокоширотной ионосферой, и токи магнитопаузы. В работе [Левитин и др., 2011] рассматривается гигантская магнитная буря ($Dst \leq -400$ нТл), имеющая очень короткую главную фазу 2–3 часа и быстрое восстановление. Как показали модельные расчеты, наблюдаемые вариации Dst такой гигантской бури могут быть созданы токовой системой хвоста магнитосферы, в результате быстрого приближения к Земле границы плазменного слоя, и токам авроральной зоны, в результате их быстрого смещения в сторону экватора. Хотя концепция кольцевого тока считается слишком упрощенным описанием магнитосферных токовых систем, ответственных за Dst , мы используем традиционный подход к описанию главной фазы геомагнитных возмущений, пренебрегая ионосферным вкладом в Dst индекс. Частично это оправдано преимущественно умеренной интенсивностью анализируемых нами MC-бурь ($-100 < Dst_{min} \leq -50$ нТл, кроме одной бури с $Dst_{min} = -130$ нТл).

В данной работе при моделировании мы делаем ряд физических предположений, которые считаем справедливыми на главной фазе магнитной бури:

(1) сильная линейная связь $Dst = c_0 + cE^* \int Ey^* dt$, где c_0 – константа интегрирования, определяющая уровень Dst , который был непосредственно перед началом главной фазы (при $t = 0$); (2) слабая (и линейная) зависимость Dst от динамического давления Pd ; (3) слабая (и линейная) зависимость Dst от вариаций σB ММП. Справедливость этих предположений проверяется сравнением результатов расчета с экспериментальными данными и с результатами моделирования в других работах.

В данной работе, которая освещает в основном методические вопросы, мы ограничились анализом магнитных бурь, вызванных только магнитными облаками, являющимися основными источниками магнитных бурь. В работе показывается возможность использования нашей модели для предсказания отдельных магнитных бурь от MC.

2. МЕТОДИКА

Методика идентификации крупномасштабных течений солнечного ветра состоит в сравнении каждой точки базы данных OMNI [King and Papitashvili, 2004] с набором пороговых критериев по ключевым параметрам солнечного ветра и ММП и подробно описана в работе [Ермолаев и др., 2009].

Предполагается следующая аппроксимация величины Dst -индекса главной фазы магнитной бури 3-мя параметрами солнечного ветра: интегралом конвективного электрического поля E_y , динамическим давлением Pd и вариациями магнитного поля σB :

$$Dst_i = c_0 + c_E \left(\int V_x B_z dt \right)_i + c_P Pd_i + c_B \sigma B_i = \quad (1)$$

$$= c_0 + c_E (\sum_{\kappa} E_{\kappa}, \kappa=1, 2, \dots, i)_i + c_P Pd_i + c_B \sigma B_i,$$

где c_0 , c_E , c_P и c_B – коэффициенты, которые определялись для каждой бури, а \sum_{κ} – суммирование по κ (от начала бури в точке $\kappa = 1$ до конца главной фазы в точке $\kappa = i$). Вид аппроксимации определяется тем, что Dst -индекс главной фазы хорошо описывается линейной функцией интеграла электрического поля $sum E$ и слабо зависит от давления Pd и вариаций магнитного поля σB , поэтому члены с давлением и вариациями σB являются первыми членами разложения функции по малому параметру. Коэффициенты c_0 , c_E , c_P и c_B оценивались стандартным методом наименьших квадратов.

Для оценки эффективности и точности модели мы используем следующие критерии: (1) коэффициент линейной корреляции (r) между измеренным Dst и модельным Dst_{mod} (насколько хорошо модель описывает реальные вариации Dst); (2) средне-квадратичное отклонение (RMS) между измеренным значением Dst и вычисленным по модели Dst_{mod} (насколько сильно различаются значения модельного Dst_{mod} и измеренного Dst).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

На рисунке 1 приведен пример умеренной ($Dst_{min} = -78$ нТл) магнитной бури 25–27 апреля 1982, источником которой является MC. Временной ход параметров СВ и ММП показывает, что источником данной магнитной бури, возможно, является MC (низкое отношение теплового давления к магнитному $\beta \ll 1$, параметр $T/T_{exp} < 1$, сильное магнитное поле $B > 10$ нТл), но с немонотонным изменением B_z ММП. На главной фазе магнитной бури южная компонента ММП $B_z < 0$ характеризуется 2-мя сильными понижениями южной компоненты ММП до $B_z \sim -15$ нТл, соответственно, индекс Dst на главной фазе бури также меняется немонотонно (возможно, неполный 2-х ступенчатый поворот ММП связан с возрастанием плотности и/или давления в середине фазы).

На рисунке 2 приведена магнитная буря 22–24 августа 1995 г. от MC, тоже умеренной интенсивности $Dst_{min} = -61$ нТл. Главная фаза данной бури (длительностью 11 ч) характеризуется плавным монотонным понижением Dst индекса и параметров СВ и ММП. Характер изменения параметров СВ и ММП предполагает, что источником бури является MC ($\beta < 0.5$, $T < T_{exp}$, $B \sim 10$ нТл, $B_z \sim -10$ нТл).

На рисунке 3 результаты моделирования главной фазы Dst_{mod} сравниваются с измеренными значениями Dst : (а) для бури 25 апреля 1982 в интервале 2–10 ч; (б) для бури 22–23 августа 1995 г. в интервале времени 17–4 ч. Видно хорошее соответствие между измеренным индексом Dst и рассчитанным Dst_{mod} с использованием индивидуальных коэффициентов аппроксимации для обеих бурь.

Для отработки методики моделирования мы используем 16 магнитных бурь с $Dst \leq -50$ нТл источником которых являются магнитные облака MC. Для каждой из 16 MC-бурь вычисляются индивидуальные коэффициенты аппроксимаций главной фазы, которые затем усредняются. В таблице приводятся средние значения коэффициентов аппроксимаций и их среднеквадратичные отклонения (левый столбец), а также средние значения параметров СВ, по которым проводилась аппроксимация (средний столбец), и их относительные вклады в величину Dst индекса (правый столбец). Для полной выборки из 16 MC-бурь наибольший вклад в понижение Dst дает интегральное электрическое поле $sum E_y$; суммарный вклад динамического давления Pd и флуктуаций σB ММП в повышение Dst (ослабление бури) в несколько раз слабее. Однако большие средне-квадратичные отклонения, сопоставимые с величиной самого коэффициента, позволяют предполагать лишь тенденцию такой зависимости.

Для уменьшения погрешности из 16 MC-бурь было отобрано 10 MC-бурь, для которых величины коэффициентов аппроксимаций не выходили за пределы 2σ (σ – стандартное среднеквадратичное отклонение соответствующего коэффициента). В таблице для сравнения приводятся средние значения коэффициентов аппроксимаций и их среднеквадратичные отклонения, а также средние значения параметров СВ, по которым проводилась аппроксимация, и их относительные вклады в величину Dst , полученные для выборки из 10 MC-бурь. Для выборки из 10 MC бурь существенно уменьшилась погрешность средних коэффициентов аппроксимаций, кроме того, вклад динамического давления теперь понижает Dst (отрицательный коэффициент $c_P < 0$) и компенсирует вклад флуктуаций магнитного поля σB (положительный коэффициент $c_B > 0$).

На рисунке 4а для выборки из 10 MC-бурь показана зависимость измеренного Dst -индекса, на

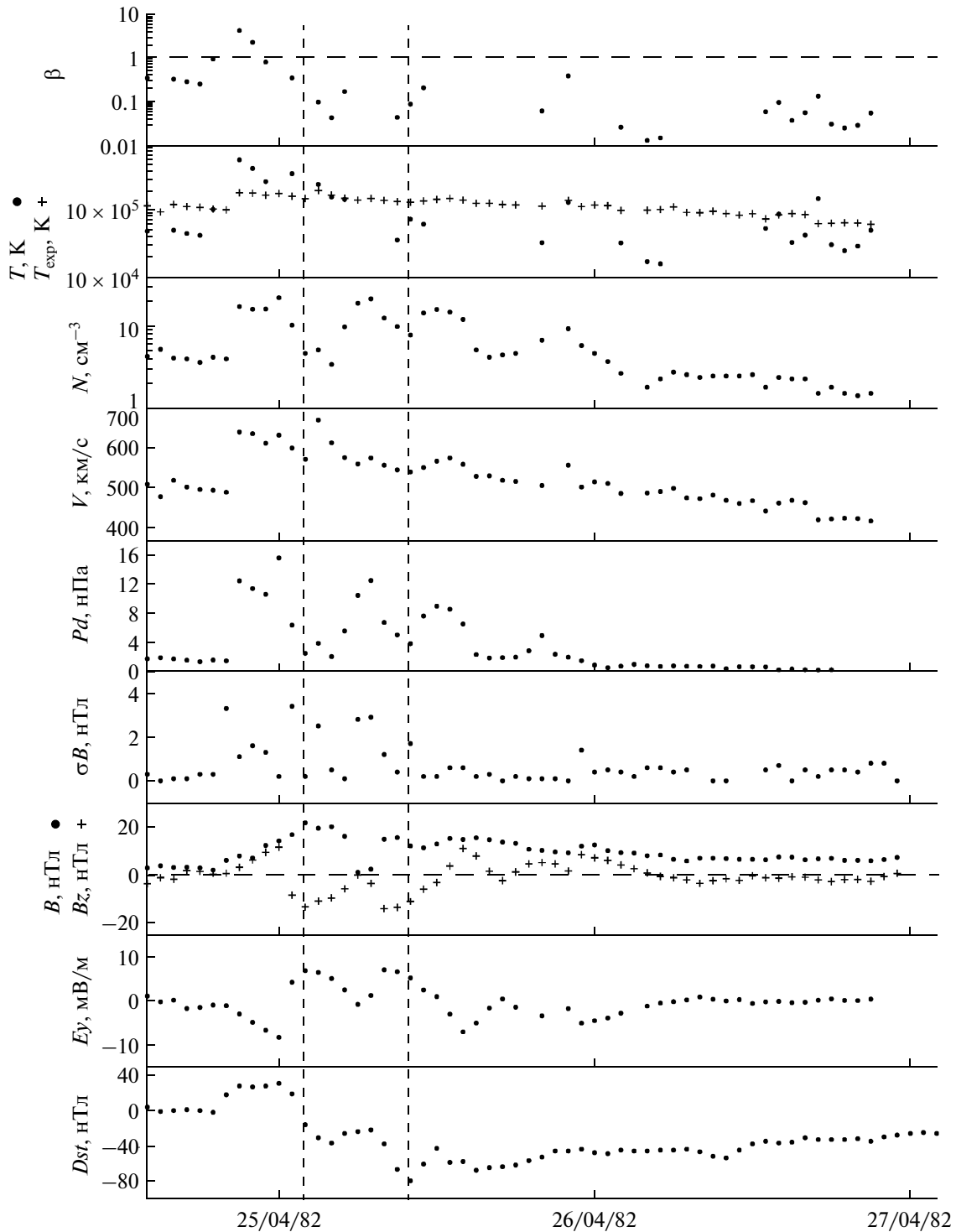


Рис. 1. Магнитная буря 25–27 апреля 1982 г. от МС. Сверху вниз: параметр β , температура плазмы T измеренная (точки) и T_{exp} (крестики), плотность N , скорость V , динамическое давление Pd , флуктуации ММП σB , величина и B_z компонента (крестики) ММП, межпланетное электрическое поле E_y , индекс Dst . Вертикальные штриховые линии отмечают главную фазу бури.

главной фазе, от модельного значения Dst_{mod} , посчитанного по индивидуальным коэффициентам аппроксимаций для каждой бури (без усреднения). Коэффициент корреляции между Dst и Dst_{mod}

очень высокий $r = 0.99$, среднеквадратичное отклонение между Dst и Dst_{mod} мало $\text{RMS} = 2.6$ нТл. То есть, индивидуальные коэффициенты аппроксимации главной фазы бури дают наилучший ре-

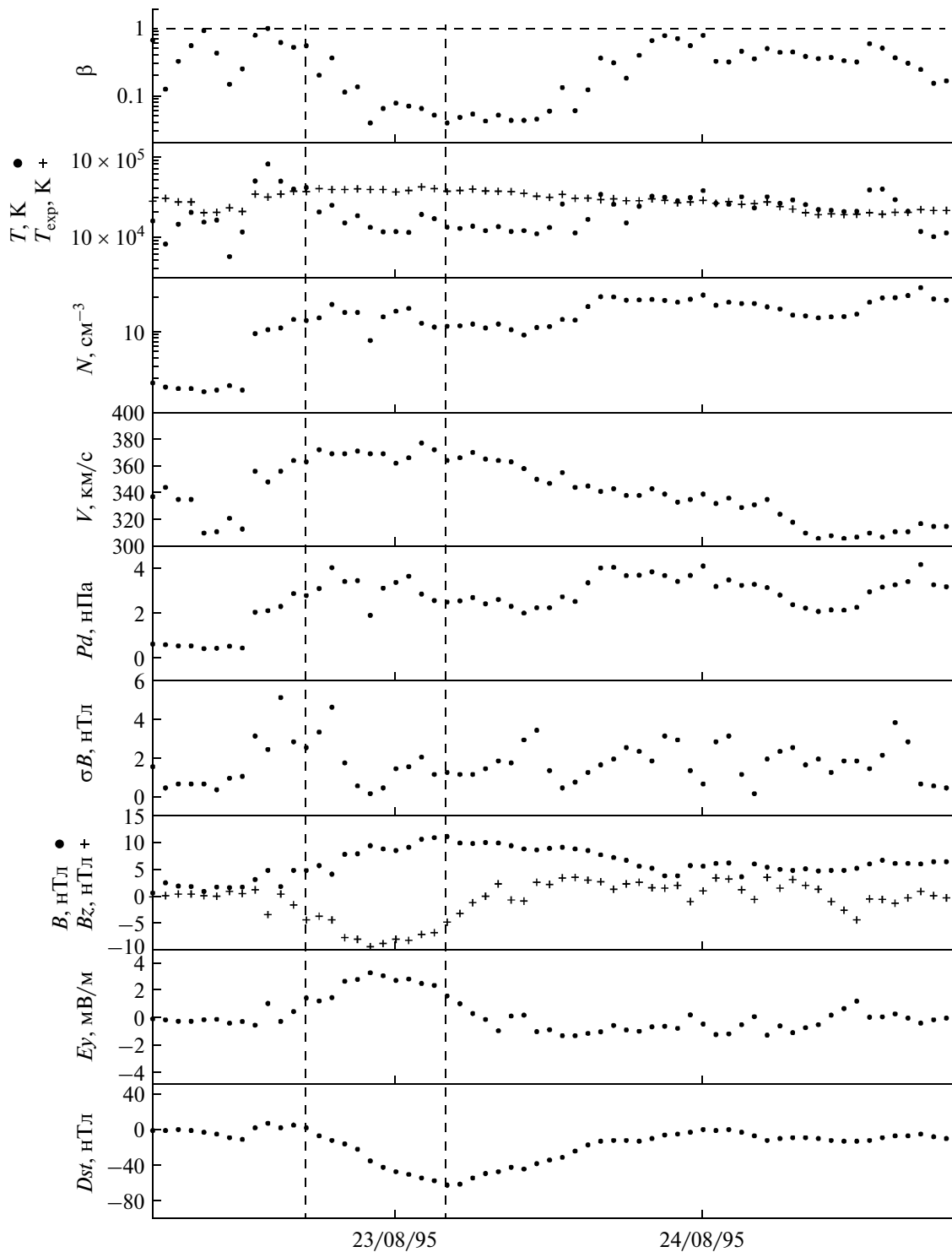


Рис. 2. Магнитная буря 22–24 августа 1995 г. от МС. Обозначения те же, что на предыдущем рис. 1.

зультат для моделирования главной фазы всех 10 МС-бурь.

На рисунке 4б показана та же зависимость, что на предыдущем рис. 4а, но модельные расчеты Dst_{mod} сделаны по усредненным значениям (для

10 МС-бурь) коэффициентов аппроксимаций. При таком моделировании коэффициент корреляции между измеренным Dst значением на главной фазе и модельным Dst_{mod} уменьшается до $r = 0.65$, а средне-квадратичное отклонение возрастает до

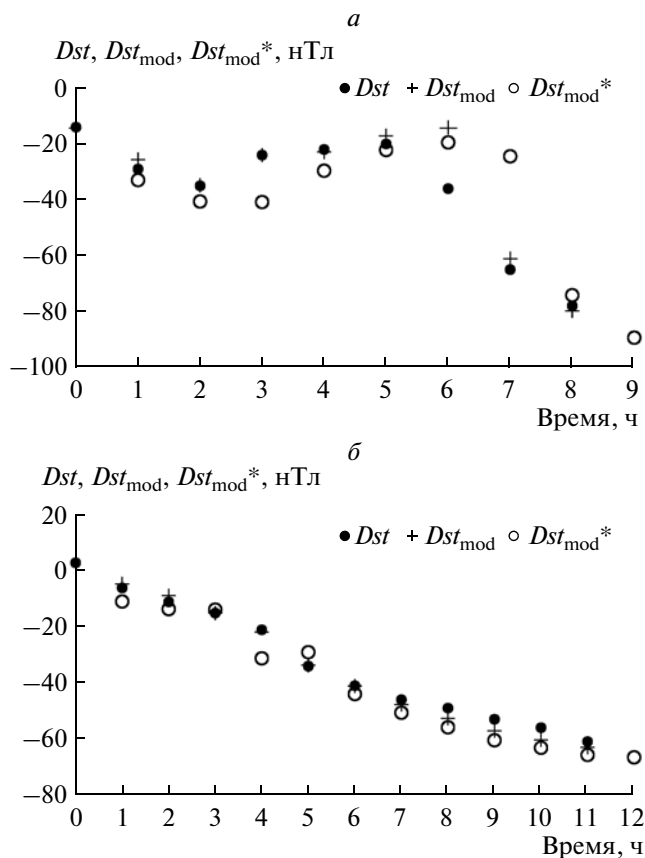


Рис. 3. Сопоставление измеренного Dst индекса (жирные точки), рассчитанного по модели Dst_{mod} с индивидуальными значениями коэффициентов (крестики) и Dst_{mod}^* (пустые кружки), предсказанного на 1 ч позднее по нашему алгоритму на главной фазе магнитных бурь: (а) 2–10 ч 25.04.82 (коэффициенты аппроксимации $c_0 = -7.81$, $c_E = -1.71$, $c_P = 3.87$, $c_B = -1.53$); (б) 17 ч 22.08.95–4 ч 23.08.95 ($c_0 = 1.72$, $c_E = -2.16$, $c_P = -0.96$, $c_B = 0.53$).

RMS = 21.73 нТл, что на порядок выше, чем для модели с использованием индивидуальных коэффициентов.

Чтобы улучшить модельную аппроксимацию хода Dst по средним значениям коэффициентов, была выполнена дополнительная процедура расчета коэффициента c_0 . Предварительно были сделаны некоторые оценки возможной связи коэффициентов c_0 с усредненной величиной Dst по 3 точкам ($aveDst$): 1-ая точка главной фазы бури и 2 предыдущие точки. Зависимость величины коэффициента c_0 для каждой бури от средней величины $aveDst$ показана на рис. 4в. Видно, что между этими параметрами наблюдается линейная зависимость ($c_0 = 0.68 \text{ } aveDst - 6.5$) с коэффициентом корреляции 0.73 (т.е. высота Dst на главной фазе заметно зависит от предыстории, а наклон индекса — от интегрального электрического поля, динамического давления и вариаций магнитного поля).

На рисунке 4г показана зависимость Dst измеренного от Dst_{mod} , когда вместо постоянного среднего значения c_0 , для каждой бури i взяты значения, рассчитанные из указанной выше зависимости коэффициента c_0 (см. рис. 4в): $Dst_{mod} = (c_0)_i + \langle c_E \rangle * sumEy + \langle c_P \rangle * Pd + \langle c_B \rangle * \sigma B$, где $(c_0)_i = 0.68 * (aveDst)_i - 6.5$ (здесь величина $(aveDst)_i$ — среднее значение Dst по 3-м точкам), а остальные коэффициенты $\langle c_E \rangle = -2.55$, $\langle c_P \rangle = -0.92$, $\langle c_B \rangle = 1.28$, как и прежде, взяты из усреднений по всем 10 МС бурям. Видно, что данная версия модели лучше описывает наши экспериментальные данные, чем предыдущая версия: коэффициент линейной корреляции возрастает до 0.83 (против 0.65), среднеквадратичное отклонение уменьшается до RMS = 15.6 нТл (против RMS = 21.7 нТл).

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

4.1. Сравнение с другими моделями

Результаты моделирования линейной зависимостью от 3-х параметров СВ показывают, что для 10 МС-бурь эффективность и точность моделирования наилучшая для индивидуальных коэффициентов аппроксимации фазы каждой бури (коэффициент корреляции $r = 0.99$ и RMS = 2.6 нТл). Аппроксимация главной фазы усредненными коэффициентами уменьшает коэффициент корреляции между Dst и Dst_{mod} до $r = 0.65$ и почти на порядок ухудшает точность моделирования RMS = 21.73 нТл. Но более физическое определение только одного параметра c_0 позволяет улучшить модель: коэффициент корреляции возрастает $r = 0.83$ и уменьшается RMS = 15.6 нТл (против $r = 0.66$ и RMS = 27.5 нТл для зависимости Dst от Dst_{mod} только от одного параметра $sumEy$ для 17 МС-бурь [Николаева и др., 2012б]).

В работе ([Ji et al., 2012], их таблица 6) приводятся данные о точности предсказания Dst для 6-ти разных моделей: модель В [Burton et al., 1975], модель FL [Fenrich and Luhmann, 1998], модель OM [O'Brien and McPherron, 2000a], модель W [Wang et al., 2003], модель NM [Boynnton et al., 2011], модель TL [Temerin and Li, 2002; 2006]. Наилучший результат дает TL модель [Temerin and Li, 2002; 2006] с коэффициентом корреляции $CC = 0.88$, что выше, чем у нас, и RMS = 15.0 нТл, что близко к нашему значению RMS = 15.6 нТл. Величина RMS = 15.6 нТл для нашей улучшенной модели совпадает с величиной RMS = 15.6 нТл для модели W [Wang et al., 2003], и близка к RMS для 3-х моделей [O'Brien and McPherron, 2000a; Temerin and Li, 2002, 2006; Boynnton et al., 2011]. Точность нашей модели (RMS = 15.6 нТл) почти в 2 раза лучше, чем для модели [Burton et al., 1975] (RMS = 31.7 нТл) и чем (RMS = 25.0 нТл) для модели [Fenrich and Luhmann, 1998].

Средние значения и среднеквадратичные отклонения коэффициентов аппроксимации, средних значений параметров СВ, и их вклады

Все 16 MC-бурь с $Dst \leq -50$ нТл		
коэффициенты	средние значения	вклад параметра
$\langle c0 \rangle = -29.01 \pm 72.78$	$\langle sumEy \rangle = 19.85 \pm 14.93$ $\langle Pd \rangle = 4.64 \pm 4.15$ $\langle \sigma B \rangle = 3.50 \pm 2.86$	$\langle cE \rangle * \langle sumEy \rangle = -55.38$ $\langle cP \rangle * \langle Pd \rangle = 7.93$ $\langle cB \rangle * \langle \sigma B \rangle = 3.11$
$\langle cE \rangle = -2.79 \pm 2.21$		
$\langle cP \rangle = 1.71 \pm 6.74$		
$\langle cB \rangle = 0.89 \pm 3.63$		
Выборка из 10 MC-бурь с $Dst \leq -50$ нТл		
коэффициенты	средние значения	вклад параметра
$\langle c0 \rangle = -13.77 \pm 14.4$	$\langle sumEy \rangle = 16.24 \pm 9.78$ $\langle Pd \rangle = 3.62 \pm 2.27$ $\langle \sigma B \rangle = 3.07 \pm 2.4$	$\langle cE \rangle * \langle sumEy \rangle = -41.41$ $\langle cP \rangle * \langle Pd \rangle = -3.33$ $\langle cB \rangle * \langle \sigma B \rangle = 3.92$
$\langle cE \rangle = -2.55 \pm 0.78$		
$\langle cP \rangle = -0.92 \pm 2.9$		
$\langle cB \rangle = 1.28 \pm 3.3$		

Сравнение коэффициентов корреляции и величины RMS нашей улучшенной версии модели и 6-ти моделей, представленных в работе ([Ji et al., 2012] см. их табл. 2–3) для группы из 27 сильных бурь, вызванных sMC (магнитными облаками с ударной волной перед ними), показывает, что наша модель имеет такой же коэффициент корреляции 0.83, что и FL модель [Fenrich and Luhmann, 1998]. Другие 5 моделей, включая В модель [Burton et al., 1975], дают более высокий коэффициент корреляции между $CC = 0.88$ для NM модели [Boynnton et al., 2011], и наилучшим результатом $CC = 0.94$ для TL модели [Temerin and Li, 2002, 2006]. Различие объясняется как небольшой статистикой в нашей выборке, так и тем, что мы сравниваем сильные магнитные бури от sMC с умеренными магнитными бурями от наших MC. Стоит отметить, что для сильных бурь от sMC модель В [Burton et al., 1975] дает выше коэффициент корреляции (0.89 против нашего 0.83), но точность ее хуже (RMS = 51.4 нТл против нашего RMS = 15.6 нТл).

Отметим также, что модель FL [Fenrich and Luhmann, 1998] создавалась для моделирования MC-бурь, для этого авторы модифицировали формулу [Burton et al., 1975]: 1) скорость инжекции кольцевого тока Q зависит не только от Ey , но и от Pd (считая, что более сильное давление Pd способствует большему переносу энергии в магнитосферу, благодаря увеличению магнитного пересоединения); 2) величина τ , характеризующая спад кольцевого тока, зависит от величины электрического VBs ($\tau = 7.7$ при низкой величине $VBs \leq 4$ мВ/м, $\tau = 3$ при высоких значениях $VBs > 4$ мВ/м). По сравнению с нашей моделью данная модель имеет в 2 раза более высокую величину RMS = 51.7 нТл, но величины коэффициентов корреляции полностью совпадают.

4.2. Возможный алгоритм предсказания Dst главной фазы

Полученные нами результаты можно использовать в качестве алгоритма для предсказания Dst главной фазы магнитной бури (на 1 час вперед) на основании только текущих значений параметров СВ и ММП и предыдущих значений Dst индекса.

Идея алгоритма заключается в следующем:

- (1) до начала магнитной бури (т.е., когда $Bz \geq 0$) вычисляется только средняя величина $aveDst$ по 3-м точкам (текущая точка и 2 предыдущие);
- (2) с момента начала фазы бури ($Bz < 0$, шаг 1 бури) по формуле (1) рассчитывается Dst_{mod} в текущей точке (i) по усредненным значениям коэффициентов аппроксимации, полученным ранее для 10 MC бурь (здесь $c0(i)$ – функция $aveDst(i)$ из рис. 6 в виде $y = 0.689x - 6.507$, где x – среднее $aveDst$); кроме того, предполагая, что в следующий час все параметры останутся без изменений, рассчитывается модельное значение на 1 час позже (т.е., предсказание), как $Dst_{mod}^*(i+1) = c0(i) + \langle cE \rangle sumEy(i+1) + \langle cP \rangle Pd(i) + \langle cB \rangle \sigma B(i)$, где $sumEy(i+1) = sumEy(i) + Ey(i)$;
- (3) для следующих 2-х точек фазы ($Bz < 0$, шаги 2 и 3) коэффициенты $c0$ и cE рассчитываются из значений текущих и предыдущих точек для линейной аппроксимации с двумя коэффициентами (т.е. пренебрегаем зависимостью от Pd и σB), и эти коэффициенты используются для расчета значений Dst (т.е. Dst_{mod} и Dst_{mod}^*), при этом используются средние коэффициенты $\langle cP \rangle$ и $\langle cB \rangle$,
- (4) начиная с 4-й точки и до конца главной фазы (шаги 4 и более, до Dst_{min}) для вычисления модельного в текущей точке Dst_{mod} и предсказанного на 1 час позже Dst_{mod}^* используются индивидуаль-

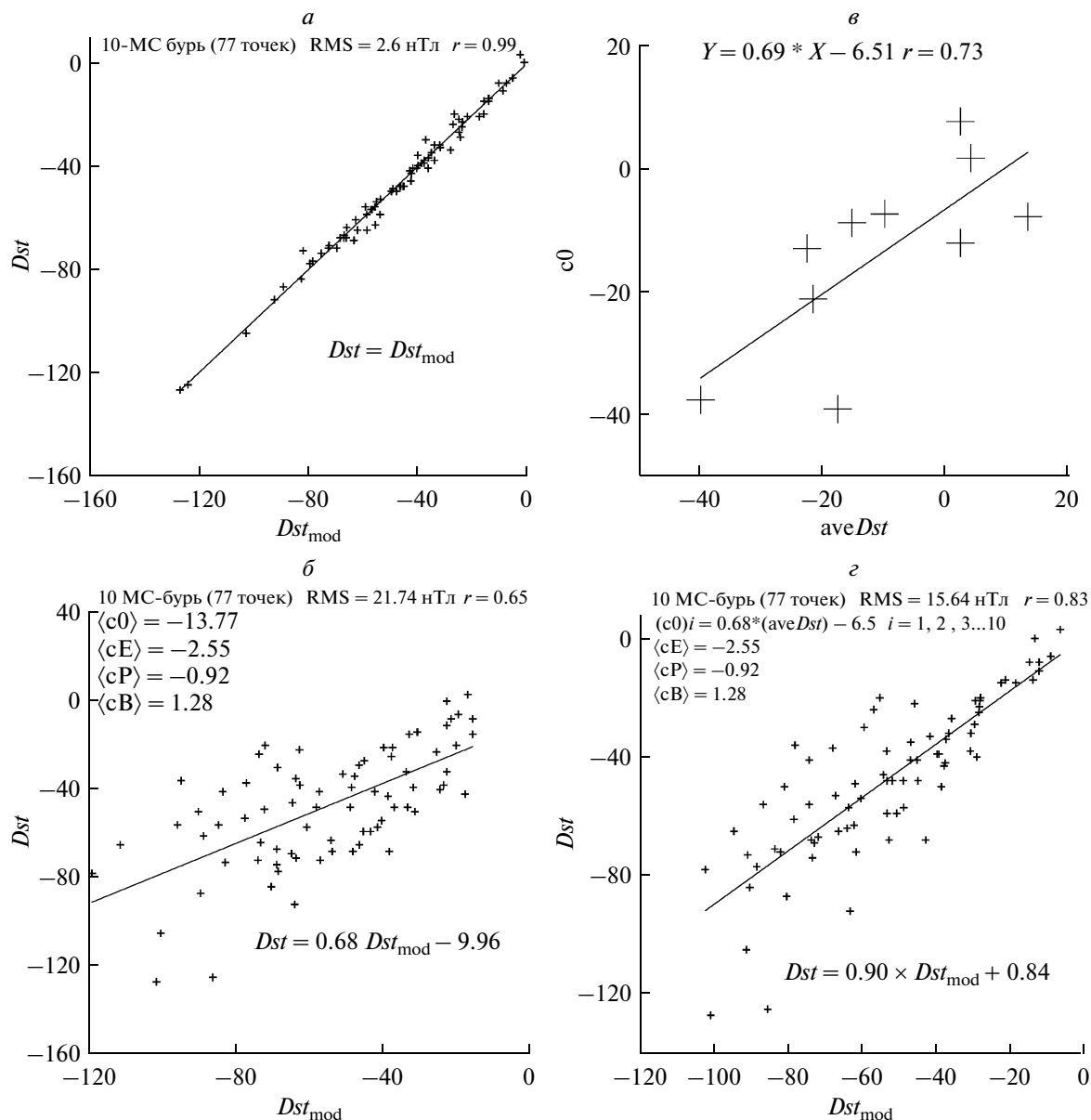


Рис. 4. Сравнение измеренного индекса Dst с моделированным значением Dst_{mod} для 10 магнитных бурь от МС: (а) версия модели с индивидуальным набором коэффициентов аппроксимации; коэффициент линейной корреляции $r = 0.99$, $RMS = 2.6$ нТл; сплошная линия показывает $Dst = Dst_{mod}$; (б) версия модели с усредненными коэффициентами аппроксимации ($\langle c0 \rangle = -13.77$, $\langle cE \rangle = -2.55$, $\langle cP \rangle = -0.92$, $\langle cB \rangle = 1.28$); коэффициент линейной корреляции $r = 0.65$, $RMS = 21.73$ нТл; сплошная линия показывает линию регрессии $Dst = 0.64 * Dst_{mod} - 4.93$; (в) зависимость коэффициента $c0$ от величины $aveDst$, усредненной по 3 точкам (1 точка – начало бури и 2 точки – перед началом бури); (г) улучшенная версия модели с коэффициентом $(c0)_i = 0.68 * (aveDst)_i - 6.5$, $i = 1, 2, 3 \dots 10$; $\langle cE \rangle = -2.55$, $\langle cP \rangle = -0.92$, $\langle cB \rangle = 1.28$; коэффициент линейной корреляции $r = 0.83$, $RMS = 15.64$ нТл; сплошная линия показывает линию регрессии $Dst = 0.90 * Dst_{mod} + 0.84$.

ные коэффициенты аппроксимации, рассчитанные методом наименьших квадратов по точкам фазы от ее начала и до текущей точки фазы.

Результаты расчетов по данному алгоритму показаны на рис. 3 (а, б), на котором сравниваются измеренные значения Dst (черные точки) главной фазы с модельными значениями Dst_{mod} (крести-

ки) и с предсказанными на 1 час позднее Dst_{mod}^* (кружки). Оценки показывают, что для бури 25 апреля 1982 г. (рис. 3а): среднее значение измеренного индекса и среднеквадратичное отклонение $\langle Dst \rangle = -35.89 \pm 20.37$ нТл, среднее значение и ср. кв. откл. по модельным расчетам $\langle Dst_{mod} \rangle = -32.6 \pm 21.5$ нТл и по модельным предсказаниям на 1 ч

позже $\langle Dst_{mod}^* \rangle = -41.5 \pm 22.9$ нТл. Для магнитной бури 23 августа 1995 г. (рис. 3б), соответственно, $\langle Dst \rangle = -32.5 \pm 20.77$ нТл, $\langle Dst_{mod} \rangle = -34.4 \pm 21.2$ нТл, $\langle Dst_{mod}^* \rangle = -42.1 \pm 20.6$ нТл.

Рисунок 3 наглядно иллюстрирует, что наша модель немного лучше предсказывает Dst на монотонно меняющейся главной фазе умеренной бури ($RMS = 20.6$ нТл для бури 23 августа 1995 г.), чем на немонотонной фазе ($RMS = 22.9$ нТл для бури 25 апреля 1982 г.). Для немонотонной фазы (рис. 3а) наше предсказание занижает величину Dst (относительно измеренного значения) в начальной части фазы и несколько завышает в конечной половине фазы. Для монотонно развивающейся фазы бури (рис. 3б) наша модель предсказывает более низкое значение Dst почти во всех точках главной фазы бури.

5. ВЫВОДЫ

Данная работа, в основном, является методической. Основная цель работы — проверка нашей гипотезы о линейной зависимости Dst главной фазы магнитной бури от 3-х параметров СВ, включающих интегральное электрическое поле в текущей точке фазы $sumEu$, величину динамического давления и уровень флуктуаций ММП, а также предыдущих значений Dst индекса (коэффициент $c0$). Для отработки полной методики моделирования главной фазы использовались 10 магнитных бурь ($Dst \leq -50$ нТл, источником которых являются магнитные облака МС. В результате проведенной методической работы можно сделать следующие выводы:

1) Добавление в линейную зависимость Dst главной фазы бури от МС еще 2-х параметров СВ (динамическое давление Pd , уровень флуктуаций σB ММП) приводит к некоторому улучшению результатов моделирования главной фазы (коэффициент корреляции $r = 0.65$, $RMS = 21.73$ нТл при усреднении коэффициентов аппроксимации по 10 МС-бурям). Аппроксимация Dst линейной зависимостью только от параметра $sumEu$ дает $r = 0.66$, $RMS = 27.5$ нТл.

2) Эффективность моделирования существенно улучшается, если коэффициент $c0$ оценивать из усреднений по 3-м точкам, включающим не только начало магнитной бури, но и 2 предыдущие точки. Для данной версии модели коэффициент корреляции увеличивается до $r = 0.83$, а среднеквадратичное отклонение между измеренным и модельным Dst уменьшается до 15.6 нТл.

3) Версия модели с индивидуальными коэффициентами аппроксимации главной фазы дает наилучшие результаты: коэффициент корреляции

$r = 0.99$, среднеквадратичное отклонение между ними понижается почти на порядок до 2.6 нТл.

Поскольку одной из главных задач подобных исследований является прогнозирование Dst магнитных бурь с наилучшей точностью, то данную методическую работу мы рассматриваем, как основу для дальнейшего совершенствования модели и повышения эффективности ее предсказания.

Кроме того, приведенная в работе методика моделирования будет использована для построения модели главной фазы магнитных бурь, вызванных другими типами источников СВ (CIR, Ejecta, Sheath, МС + Ejecta). Это позволит сравнить модели магнитных бурь для разных типов солнечного ветра. Так как и алгоритм определения типа солнечного ветра [Ермолаев и др., 2009], и алгоритм предсказания величины Dst индекса используют текущие значения параметров плазмы солнечного ветра и межпланетного магнитного поля, то представленные в данной работе результаты могут быть использованы для прогнозирования магнитных бурь в реальном времени.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г., Ермолаев М.Ю. Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976–2000 гг. // Космич. исслед. № 2. Р. 99–113. 2009 (Cosmic Research. 2009. V. 47. № 2. Р. 81–94).
- Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г., Николаева Н.С., Ермолаев М.Ю. Статистическое исследование влияния межпланетных условий на геомагнитные бури // Космич. исслед. Т. 48. № 6. С. 499–515. 2010.
- 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. Т. 49. № 1. С. 24–37. 2011.
- 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. Р. 29–32. 2011.
- 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 аэронавтика. Т. 51. № 1. С. 51–67. 2011.
- 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 аэрономия. Т. 52. № 1. С. 42–53. 2012а.
- 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 аэрономия. Т. 52. № 1. С. 42–53. 2012б.
- Amata E., Pallochia G., Consolini G., Marcucci M.F., Bertello I. Comparison between three algorithms for Dst predictions over the 2003–2005 period // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. V. 70. P. 496–502. 2008.
- Borovsky J.E., Denton M.H. Differences between CME-driven storms and CIR-driven storms // J. Geophys. Res. V. 111. 2006. A07S08. doi:10.1029/2005JA011447. 2006.
- Boynton R.J., Balikhin M.A., Billings S.A., Sharma A.S., Amariutei O.A. Data derived NARMAX Dst model // Ann. Geophys. V. 29. P. 965–971. 2011.
- Burton R.K., McPherron R.L., Russell C.T. An empirical relationship between interplanetary conditions and Dst // J. Geophys. Res. V. 80. P. 4204–4214. 1975.
- Cerrato Y., Saiz E., Cid C., Gonzalez W.D., Palacios J. Solar and interplanetary triggers of the largest Dst variations of the solar cycle 23 // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics V. 80. P. 111–123. 2012.
- Denton M.H., Borovsky J.E., Skoug R.M., Thomsen M.F., Lavraud B., Henderson M.G., McPherron R.L., Zhang J.C., Liemohn M.W. Geomagnetic storms driven by ICME and CIR-dominated solar wind // J. Geophys. Res. V. 111. A07S07, doi:10.1029/2005JA011436. 2006.
- Despirak I.V., Lubchich A.A., Guineva V. Development of substorm bulges during storms of different interplanetary origins // J. Atmos. Sol.–Terr. Phys. V. 73. P. 1460–1464. 2011.
- Feldstein Y.I. Modelling of the Magnetic Field of Magnetospheric Ring Current as a Function of Interplanetary Parameters // Space Sci. Rev. V. 59. P. 83–165. 1992.
- Fenrich F.R., Luhmann J.G. Geomagnetic response to magnetic clouds of different polarity // Geophys. Res. Lett. V. 25. P. 2999–3002. 1998.
- Guo J., Feng X., Emery B.A., Zhang J., Xiang C., Shen F., Song W. Energy transfer during intense geomagnetic storms driven by interplanetary coronal mass ejections and their sheath regions // J. Geophys. Res. V. 116. A05106, doi:10.1029/2011JA016490. 2011.
- 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. V. 33. P. L06107. doi:10.1029/2005GL024894. 2006.
- Ji E.-Y., Moon Y.-J., Gopalswamy N., Lee D.-H. Comparison of Dst forecast models for intense geomagnetic storms // J. Geophys. Res. V. 117. A03209, doi:10.1029/2011JA016872. 2012.
- Kane R.P. Severe geomagnetic storms and Forbush decreases: interplanetary relationships reexamined // Ann. Geophys. V. 28. P. 479–489. 2010.
- Klimas A.J., Vassiliadis D., Baker D.N. Dst index prediction using data-derived analogues of the magnetospheric dynamics // J. Geophys. Res. V. 103. P. 20435–20447. 1998.
- 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. V. 110. N. A2. P. A02209. doi:10.1029/2004JA010804. 2004.
- Liemohn M.W., Jazowski M., Kozyra J.U., Ganushkina N., Thomsen M.F., Borovsky J.E. CIR versus CME drivers of the ring current during intense magnetic storms // Proc. R. Soc. A. V. 466. P. 3305–3328. doi:10.1098/rspa.2010.0075. 2010.
- Longden N., Denton M.H., Honary F. Particle Precipitation during ICME-Driven and CIR-Driven Geomagnetic Storms // J. Geophys. Res. V. 113. P. A06205. doi:10.1029/2007JA012752. 2008.
- Maltsev Y.P. Points of controversy in the study of magnetic storms // Space Science Reviews V. 110. P. 227–267. 2004.
- McPherron R.L., O'Brien T.P. Predicting geomagnetic activity: The Dst index // in Space Weather. Geophys. Monogr. Ser. edited by P. Song, Singer H.J., Siscoe G.L. AGU. Washington. D. C. V. 125. P. 339–345. 2001.
- 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. V. 105. P. 7707–7720. 2000a.
- O'Brien T.P., McPherron R.L. Forecasting the ring current index Dst in real time, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics V. 62. P. 1295–1299. 2000b.
- Ontiveros V., Gonzalez-Esparza J.A. Geomagnetic Storms caused by shocks and ICMEs // J. Geophys. Res. V. 115. A10244. doi:10.1029/2010JA015471. 2010.
- Plotnikov I.Ya., Barkova E.S. Nonlinear Dependence of Dst and AE Indices on the Electric Field of Magnetic Clouds // Adv. Space Res. V. 40. P. 1858–1862. 2007.
- Podladchikova T.V., Petrukovich A.A. Extended geomagnetic storm forecast ahead of available solar wind measurements. Space Weather. V. 10. S07001. doi:10.1029/2012SW000786. 2012.
- Pulkkinen T.I., Partamies N., Huttunen K.E.J., Reeves G.D., Koskinen H.E.J. Differences in geomagnetic storms driven by magnetic clouds and ICME sheath regions // Geophys. Res. Lett. V. 34. L02105, doi:10.1029/2006GL027775. 2007.
- Siscoe G., McPherron R.L., Liemohn M.W., Ridley A.J., Lu G. Reconciling prediction algorithms for Dst // J. Geophys. Res. V. 110. P. A02215. doi:10.1029/2004JA010465. 2005.
- 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. V. 58. P. 331–341. 2006.
- Temerin M., Li X. A new model for the prediction of Dst on the basis of the solar wind // J. Geophys. Res. V. 107. № A12. P. 1472. doi:10.1029/2001JA007532. 2002.

- *Temerin M., Li X.* Dst model for 1995–2002 // *J. Geophys. Res.* V. 111. A04221. doi:10.1029/2005JA011257. 2006.
- *Tsyganenko N.A., Sitnov M.I.* Modeling the dynamics of the inner magnetosphere during strong geomagnetic storms // *J. Geophys. Res.* 110. A03208, doi:10.1029/2004JA010798. 2005.
- *Turner N.E., Cramer W.D., Earles S.K., Emery B.A.* Geoefficiency and Energy Partitioning in CIR-Driven and CME-Driven Storms // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* V. 71. P. 1023–1031. 2009.
- *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.* V. 104. № A11. P. 24957–24976. 1999.
- *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.* V. 108. № A9. P. 1341. doi:10.1029/2003JA009851. 2003.
- *Weigel R.S.* Solar wind density influence on geomagnetic storm intensity // *J. Geophys. Res.* VOL. 115. A9. A09201. doi:10.1029/2009JA015062. 2010.
- *Wu J.-G., Lundstedt H.* Neural network modeling of solar wind–magnetosphere interaction // *J. Geophys. Res.* V. 102. № A7. P. 14457–14466. 1997.
- *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.* V. 28. P. 2177–2186. 2010.
- *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.* V. 117. 2012. A00L07, doi:10.1029/2011JA017139. 2012.