

УДК 550.385.36

**О. И. Максименко, Л. Н. Яременко, О. Я. Шендеровская,
Г. В. Мельник, Т. А. Мозговая**

Институт геофізики ім. С. І. Субботіна Національної академії наук України, Київ
mozgowa@igph.kiev.ua

Модели геомагнитного поля и характеристики магнитных бурь

Доповідь на конференції 05.09.05

Наведено результати модельного розрахунку магнітного поля Землі під час магнітних бурь 7-8 листопада 2004 р. ($D_{st} = -370$ нТл), 15 травня 1997 р. ($D_{st} = -115$ нТл) та малої бурі 15 липня 1997 р. ($D_{st} = -51$ нТл). Використовувалась модель магнітного поля внутрішньої магнітосфери Циганенка T02. Зроблено спробу виявлення деяких особливостей глобального розподілу поля в навколосезному просторі, оцінено вклади полів від зовнішніх джерел: кільцевого струму, струму хвоста магнітосфери, Біркеландівських струмів, поля диполя в загальне модельне магнітне поле під час магнітних бурь, модельні величини поля на поверхні Землі зіставляються зі спостереженими величинами D_{st} на наземних станціях та з SYM-індексами.

ВВЕДЕНИЕ

Модель T02 магнитного поля в ближней магнитосфере ($X \leq 15R_E$) создана Н. А. Цыганенко в 2002 г. на новой базе данных магнитометрических измерений с улучшенным методом параметризации источников внешнего поля в солнечном ветре для описания изменений конфигурации внутренней и внешней магнитосферы при различных межпланетных условиях и уровнях наземной возмущенности [1, 2]. Внешнее поле Земли представлено линейной комбинацией семи векторов поля, определяющих главное поле Земли внутри моделирующих границ: поле токов Чепмена — Феррари B_{cf} , поле токов хвоста магнитосферы B_{rt} , поле симметричного кольцевого тока B_{src} , поле асимметричного кольцевого тока B_{prc} , поля в областях 1 и 2 от системы крупномасштабных биркеландовских токов B_{birc1} , B_{birc2} , проникающая составляющая межпланетного магнитного поля B . Модель построена на модульной основе. Использована новая техника — метод деформации поля для описа-

ния всех основных источников магнитосферного магнитного поля.

Выбирается простая прозрачная модель отклика поля каждого источника на внешние условия. В модели кольцевого тока предложен принципиально новый источник наблюдаемого внешнего поля в области менее восьми радиусов Земли. Впервые вместо простого эмпирического кольцевого тока, используемого ранее в T96, даны более точные приближения. Ток рассчитывается на основе электрических полей, определенных из наблюдаемых распределений давления частиц и их анизотропии. При этом в расчете учитывается утренне-вечерняя асимметрия кольцевого тока в течение бури. В дополнение к модулю для аксиально-симметричной части кольцевого тока в отдельном модуле введен асимметричный частичный кольцевой ток с продольными замыкающими токами, связанными с локальной асимметрией азимутального тока. В модели частичного тока также дополнительно включен нелинейный свободный параметр — угол вращения.

С помощью этой модели описывают:

- вклад от основных магнитосферных систем электрических токов (кольцевого тока аксиального и частичного КТ, поперечных токов хвоста, биркеландовских токов и токов на магнитопаузе) в полное магнитное поле;
- отклонение модельного поля (индивидуальных источников поля в том числе) от данных наблюдений поля на поверхности Земли или в любом заданном координатами месте магнитосферы;
- расположение токовых структур кольцевого и частичного, биркеландовского и хвостового тока с учетом угла наклона геодиполя в зависимости от состояния ММП и солнечного ветра.

Входными параметрами модели являются: год, номер суток, час, угол наклона диполя PS (рад), давление P (нПа) солнечного ветра, D_{st} -индекс (нТл), B_y -, B_z -компоненты ММП (нТл) и параметры возмущенности $G1 = \langle Vh(B_{\perp})\sin^3(\theta/2) \rangle$, $G2 = a\langle VBs \rangle$, где V — скорость солнечного ветра, θ — часовой угол, $B_{\perp} = (B_z^2 + B_y^2)^{1/2}$, $a = 0.005$.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ВО ВРЕМЯ МАГНИТНОЙ БУРИ

Магнитная буря 7—8 ноября 2004 г. была одной из двух больших бурь, которые развились после прихода двух гигантских импульсов корпускулярного потока, на порядок превышающих фон. После 9 ноября фоновый поток оставался повышенным почти до конца месяца. Повторное внезапное начало бури сс было отмечено 7 ноября в 19:20 с положительным возмущением X -составляющей поля на поверхности Земли $X = +95$ нТл вблизи экватора (45—95 нТл для разных долгот). Главная фаза бури наблюдалась через 19 ч с пиковым значением $D_{st} = -373$ нТл, а восстановительная фаза была прервана развитием следующей большой бури. В течение этой бури были зарегистрированы интенсивные суббури с максимальной амплитудой более 1600 нТл в главную фазу бури на высокоширотных обсерваториях. На рис. 1 представлены временные профили межпланетных параметров солнечного ветра P , электрического поля VBs , вертикальной и азимутальной составляющих межпланетного магнитного поля в течение большой магнитной бури 7—8 ноября

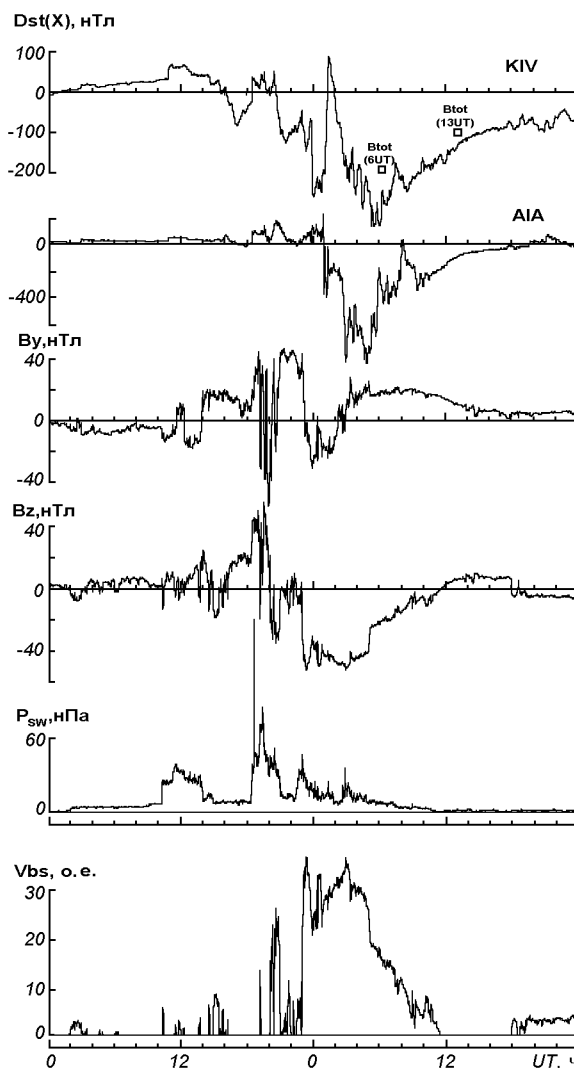


Рис. 1. Изменения параметров межпланетной среды и D_{st} в течение магнитной бури 7-8 ноября 2004 г.

2004 г. Степень наземной магнитной возмущенности определялась также по индексам SYM, при оценке которых использовались средние поля для шести низкоширотных станций по данным минутных измерений X -составной (<http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/aeasy/index.html>). Видна очень сложная картина изменчивости не только амплитуды, но и направления составляющих межпланетного поля в течение бури. Те-

стирование модели проводилось при анализе долготных, широтных вариаций наблюдаемых D_{st} на восьми станциях (в том числе двух высокоширотных) для трех магнитных бурь и последующем их сопоставлении с модельными значениями полного магнитного поля на поверхности Земли. Для сравнения модельных данных поля с наблюдаемыми, а также изучения локальных флуктуаций использовались геомагнитные данные сети INTERMAGNET для вычисления D_{st} -вариаций в течение этой бури на ряде станций в Европейско-Африканском секторе (ABK, NCK, BEL, KIV, TAM, BNG), в Американском секторе (HUA, KOU, AIA, LIV, SJG, OTT) и на реперной точке вблизи экватора GUA. Оценивались вклады полей от внешних источников: кольцевого тока B_{rc} , тока хвоста магнитосферы B_{tc} , биркеландовских токов B_{birc} , поля диполя B_{dip} в общее модельное магнитное поле B_{tot} во время магнитных бурь.

В табл. 1 даны сведения о входных параметрах модели внешнего магнитного поля Земли, которые были использованы в модельных расчетах магнитного поля для трех выбранных магнитных бурь.

Таблица 1. Входные параметры для расчета модели T02 внешнего магнитного поля Земли

Дата	UT, ч	D_{st} , нТл	P, нПа	B_y , нТл	B_z , нТл	PS, рад	G1	G2
08.11.2004 г.	6	-370	7	18	-22	-0.46	26	72
08.11.2004 г.	13	-160	1.1	11	6	-0.18	6	0
15.05.1997 г.	12	-115	1.5	20	-25	0.39	8	52
15.07.1997 г.	18	-51	1.15	8.2	-7.6	0.49	5	10

Таблица 2. Вклад полей от внешних источников по результатам моделирования магнитного поля во время магнитных бурь

B, нТл	Магнитная буря					
	15 мая 1997 г., 12 UT, главная фаза		8 ноября 2004 г., 6 UT, главная фаза		8 ноября 2004 г., 13 UT, фаза восстановления	
B_{tot}	-116...-223	100 %	-111...-370	100 %	-93...-163	100 %
B_{rc}	-30...-87	18—57 %	-91...-220	32—60 %	-115...-158	88—124 %
B_{tc}	-42...-47	25—35 %	-114...-135	31—65 %	-58...-66	39—62 %
B_{birc}	-20...-90	16—75 %	+13...-91	6—32 %	-50...-111	54—73 %
B_{dip}	15...17	7—14 %	29...35	10—30 %	12...14	9—14 %

ШИРОТНЫЕ И ДОЛГОТНЫЕ ВАРИАЦИИ МОДЕЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И D_{st} -ИНДЕКСА

Для расчета поля на поверхности Земли была выполнена следующая процедура. Вначале с помощью модели магнитного поля T96 рассчитывались трассы магнитных силовых линий в системе GSM для координат точки наблюдений при значениях B_y , B_z , угла наклона геоидполя, давления солнечного ветра, D_{st} -индекса, соответствующих моменту наблюдений. Затем модель вычисляла величину поля и всех его составляющих в системе координат GSM и переводила в географическую систему координат. В качестве наблюдаемых значений поля использовались вычисленные по стандартной методике D_{st} -индексы. При этом амплитудные значения поля корректируются на поле токов на поверхности магнитосферы согласно соотношению $D_{st}^* = D_{st} - 0.3P^{1/2} + C$, где P — динамическое давление, $C = 20$ нТл для магнитоспокойного уровня.

В табл. 2 приведены значения общего магнитного поля B_{tot} и составляющих его полей от внешних токовых источников: кольцевого тока B_{rc} , тока хвоста B_{tc} , биркеландовских токов B_{birc} для некоторых магнитных бурь. Там же дается относительная величина расчетного поля геоидполя B_{dip} . Как видно, дипольное поле в главную фазу магнитной бури на поверхности Земли изменяется в пределах 15—17 нТл, менее 14 % для $D_{st} > -160$ нТл и до 30 % (< 35 нТл) при больших $D_{st} = -370$ нТл. Полное поле от внешних источников, согласно модели, варьирует в широких пределах в зависимости от места положения станции. Во время магнитной бури в

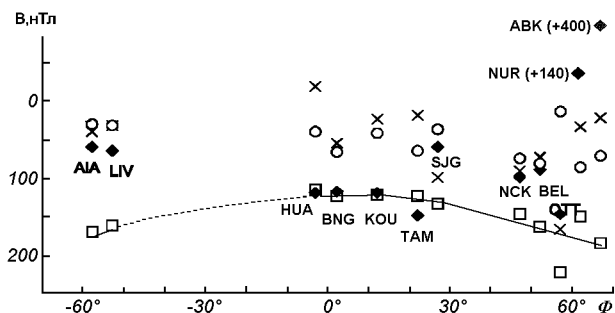


Рис. 2. Широтные изменения наблюдаемых D_{st} (темные ромбики) и соответствующих им расчетных полей B_{tot} (квадратики), B_{birc} (крестики), B_{rc} (кружки) для главной фазы магнитной бури 15.05.1997 г.

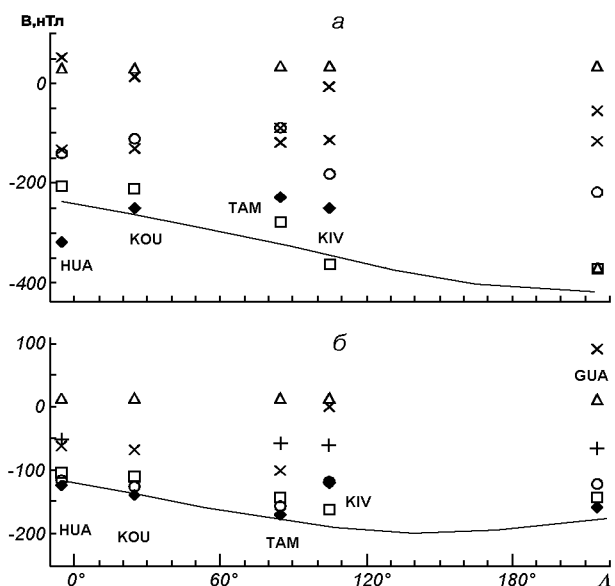


Рис. 3. Долготные вариации наблюдаемых D_{st} (темные ромбики) и расчетных полей B_{tot} (квадратики), B_{dir} (треугольники), B_{birc} (прямые крестики), B_{birc} (крестики), B_{rc} (кружки): *a* — для главной фазы (6 UT), *b* — для фазы восстановления (13 UT) магнитной бури 7–8.11.2004 г.

дневном секторе 15 мая 1997 г. вклад кольцевого тока достигал 57 %, тогда как токи хвоста составили менее 35 %. Обратим внимание на большой диапазон изменения биркеландовских токов (до 75 %). С увеличением интенсивности бури отмечено также обращение знака поля биркеландовских токов и равенство влияния кольцевого и хвостового токов на низкоширотных станциях в главную фазу бури 8 ноября 2004 г. В то же время в восстановительную фазу

этой бури вклад B_{rc} усиливается почти в два раза по отношению к току хвоста. Замечено также изменение влияния биркеландовских токов. На отдельной станции SJG 15 мая 1997 г. вклад хвостовых токов был 60 %, тогда как кольцевого тока — только 36 %. Для ОТТ их различие составляло соответственно 73 и 17 %, для BNG — 41 и 57 %.

Широтные изменения наблюдаемых D_{st} -индексов и соответствующих им расчетных значений поля B_{tot} и его составляющих для обсерваторий, расположенных в евро-африканском и американском секторах в главную фазу магнитной бури 15 мая 1997 г. в 12 UT показаны на рис. 2. Долготные вариации полей 7–8 ноября 2004 г. приведены на рис. 3 в 6 UT (*a*) и 13 UT (*b*). Следует отметить, что наблюдаемые положительные большие значения $D_{st} = 400$ нТл на высоких широтах (АВК), превышающие по абсолютной величине в два раза значения на экваторе во время главной фазы магнитной бури 15 мая 1997 г., не подтверждаются модельными расчетами. Наблюдаемые долготные эффекты (рис. 3, *b*) в виде различия пиковых D_{st} в разных долготных секторах для интенсивной бури 7–8 ноября 2004 г. как в главную, так и в восстановительную фазу также не находят полного объяснения в модели, возможно из-за большого разброса данных и недостаточной пригодности модели для использования во время таких сильных возмущений.

Таким образом, вклад полей от различных магнитосферных токовых источников в полное модельное поле на поверхности Земли лучше рассматривать только в динамике. Модель позволяет также учитывать условия в межпланетной среде ММП и солнечном ветре с 5-мин скважностью, что требует корректного использования спутниковых данных по ММП и, возможно, уменьшит дисперсию полученных расчетных данных.

ГЛОБАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЯ МАГНИТОСФЕРНЫХ ТОКОВЫХ ИСТОЧНИКОВ ВОЗМУЩЕНИЯ

На рис. 4 показаны кривые пространственного распределения составляющей полного поля $B_{z\text{tot}}$ (в системах GSM, GEO) магнитосферных токо-

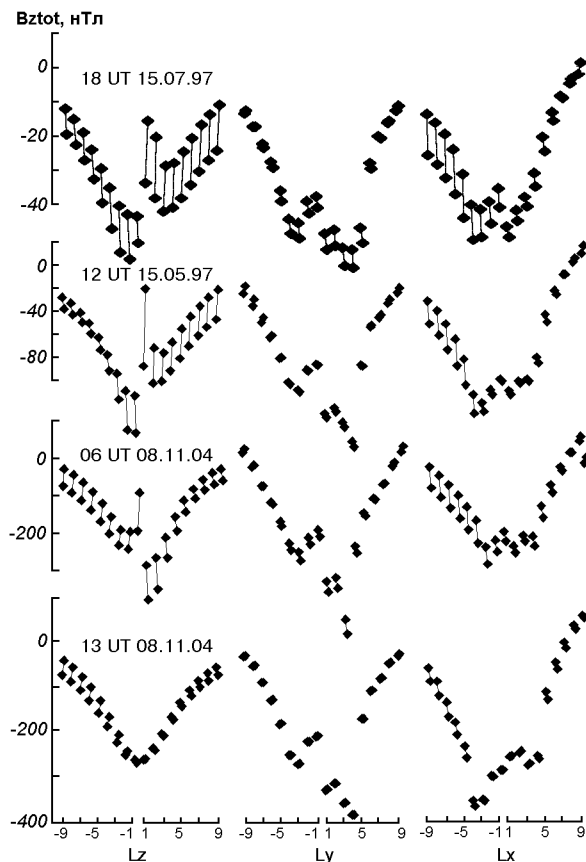


Рис. 4. Глобальные распределения расчетных модельных значений полного магнитного поля $B_{z\text{tot}}$ от внешних источников в окрестности Земли ($|L| = 1...9R_3$) для магнитных бурь: а — 15.07.97, 18 UT, б — 15.05.97, 12 UT, в — 08.11.04, 6 UT, г — 08.11.04, 13 UT

вых источников в околоземном пространстве ($L = 1...9R_3$), построенные по результатам модельных расчетов поля в главную фазу малой бури 15 июля 1997 г. в 18 UT (а), большой бури 15 мая 1997 г. в 12 UT (б), очень большой бури 7–8 ноября 2004 г. во время пика D_{st} 6 UT (в) и в восстановительную фазу этой бури 13 UT (г). Показаны профили полей вдоль осей L_z , азимутальной L_y и вдоль линии Солнце — Земля L_x в системе GSM. Хорошо проявляется максимум величины поля $B_z \sim -56$ нТл на поверхности Земли с солнечной стороны $L_x = +1R_3$, и меньше по величине и более размытый максимум $B_z \sim -49$ нТл дальше от Земли на $L_x = -4R_3$ в противоположной стороне во время

бури 15.07.1997 г. Отметим также расширение области больших полей, особенно по оси L_z , до $L_z = (3-4)R_3$ с асимметрией распределения по осям L_y и L_z . Асимметрия увеличивается во время главной фазы бури 15.05.97: максимум поля в хвостовой части на $L_x = (-3...-4)R_3$ и слабее $B_{z\text{tot}} = -115$ нТл, но более широкий на дневной стороне $L_x = +1$ и $+3R_3$. Особенно это проявляется в азимутальной плоскости с большими максимумами поля $B_z = -150$ нТл ($L_x = -4R_3$) и $B_z = -115$ нТл ($L_x = -3R_3$). В восстановительную фазу интенсивной бури 08.11.2004 г. нет различий распределений поля B_z в высоких широтах двух полушарий, но проявляется асимметрия в азимутальной плоскости, при этом резкий максимум поля ($B_z = -165$ нТл) был выделен в направлении хвоста ($L_x = 4-R_3$), тогда как на дневной стороне он существенно меньше ($B_z = -130$ нТл на $L_x = 4R_3$). Таким образом, с помощью модели можно прогнозировать северную асимметрию, различать динамику пространственного положения максимума поля. В принципе модель позволяет рассматривать объемные распределения общего магнитного поля и составляющих его полей каждого из внешних токовых источников.

Результаты сопоставления модельных и наблюдаемых значений вклада в полное поле на поверхности Земли от всех токовых источников показали наилучшее совпадение по данным станции GUA после исключения поля токов на магнитопаузе.

Новая модель Н. А. Цыганенко TO2 определяет не только средние статистические конфигурации поля в магнитосфере, но и отклик индивидуального источника на изменения во внешних условиях на расстоянии до $20R_3$. Созданная большая база 1–5-мин значений спутниковых (POLAR, GEOTAIL, AMPT/IRM, CRRES, ISSE2, DE1) измерений в интервале 1966–1999 гг. позволяет проследить динамику (предысторию в течение двух часов) развития возмущений, что так необходимо при исследовании магнитных бурь.

Приведенные модельные значения полного магнитного поля и его составляющих для некоторых моментов времени в трех бурях разной интенсивности отражают зависимость параметров источников модельного поля от состояния

солнечного ветра (давления, скорости, плотности ионов), составляющих ММП и уровня наземной возмущенности (D_{st} , SYM), но не объясняют больших отклонений $B_{z\text{tot}}$ от наблюдаемых данных D_{st} , особенно на высоких широтах и при очень сильных бурях, сопровождающихся быстро изменяющимися межпланетными условиями.

ВЫВОДЫ

1. По модельным расчетам в главную фазу магнитной бури 15.05.1997 г. на низкоширотных обсерваториях поле B_{rc} кольцевого тока составило 57 % общего поля B_{tot} , что почти в два раза больше поля B_{ic} хвостовых токов. По предварительным данным с увеличением интенсивности бури, а также в восстановительную фазу, вклады B_{rc} и B_{ic} выравниваются.

2. С помощью модели магнитного поля внутренней магнитосферы Н. А. Цыганенко (T02) удалось найти особенности пространственного распределения магнитного поля внешних источников в околоземном пространстве ($L = 1...9R_3$). Во время интенсивной магнитной бури 7–8 ноября 2004 г. — это сильная азимутальная асимметрия, увеличение B_z -составляющей в меридиональной плоскости на оболочке $L = 2$ вдоль оси Y ; при малой буре 15 июля 1997 г. — тенденция к появлению второго максимума поля на оболочке $L = -4...-5$ в сумеречной меридиональной плоскости и дополнительное расширение области повышенных значений поля до $L = -3...-4$ в направлении хвоста магнитосферы с усилением асимметрии в главную фазу во время умеренной бури 15 мая 1997 г.

3. Используемая модель магнитного поля не смогла подтвердить широтную зависимость D_{st}

15 мая 1997 г. с увеличенными положительными значениями $D_{st} = 400$ нТл на высоких широтах ($> 60^\circ$) в Европейском секторе в главную фазу бури. Отмеченные большие разбросы модельных значений поля внешних источников во время бурь не могут полностью объяснить существование долготного эффекта D_{st} . Необходима дополнительная корректировка функциональной связи входных параметров ($G1, G2$) со свободными параметрами модели даже при высокой корреляции между расчетными и наблюдаемыми значениями поля.

1. Tsyganenko N. A. A new magnetospheric magnetic field model. 1. Mathematical structure. 2. Parameterization and fitting to observations // J. Geophys. Res.—2002.—107A, N 8.—P.
2. Tsyganenko N. A., Mukai T. Tail plasma sheet models derived from Geotail particle data // J. Geophys. Res.—2003.—108A, N 3.—P. 1136.

MODELS OF THE GEOMAGNETIC FIELD AND CHARACTERISTICS OF MAGNETIC STORMS

O. I. Maksimenko, L. N. Yaremenko, O. Ya. Shenderovskaya, G. V. Melnyk, T. A. Mozgovaya

The results of our modelling calculation of the Earth's magnetic field during the magnetic storms on 7-8 November 2004 ($D_{st} = -370$ nT), 15 May 1997 ($D_{st} = -115$ nT) and during the small storm on 15 July 1997 ($D_{st} = -51$ nT) are presented. The model of magnetic field of the inner magnetosphere current systems (Tsyganenko T02) placed in the Internet is used. An attempt is made to reveal some features of global distribution of geomagnetic field in space. We estimated the contributions of the fields from external current sources, namely, ring current, magnetotail current, Birkeland currents, and fields of a dipole to general modelling magnetic field during magnetic storms. The calculated values of the fields on the Earth's surface are compared with the D_{st} values measured at a number of ground stations and with SYM indexes.