

УДК 533.9

## Порівняння емпіричних моделей магнітного поля у внутрішній магнітосфері Землі

О. П. Верхоглядова, М. Г. Панченко

Київський університет ім. Тараса Шевченка

*Надійшла до редакції 08.07.98*

---

Робота присвячена порівнянню двох нових емпіричних моделей магнітного поля внутрішньої магнітосфери Землі, а саме моделей Остапенка та Циганенка 1996 р. Показано, що моделі добре узгоджуються в приекваторіальній області земного магнітного диполя при геоцентричних відстанях 4—10 радіусів Землі  $R_E$  за умов слабкої збуреності магнітосфери. Відносне відхилення величини магнітного поля становить близько 20 %. В області геоцентричних відстаней до  $8R_E$  (до області кільцевого струму) більше значення величини магнітного поля дає модель Остапенка, а в області 8—10  $R_E$  — модель Циганенка. При збільшенні динамічного тиску сонячного вітру на лобовій частині магнітосфери та поблизу Землі моделі узгоджуються гірше.

---

### ВСТУП

Для багатьох задач фізики навколосемного простору та потреб аналізу даних космічних експериментів необхідно знати величину магнітного поля в тій чи іншій точці простору. Теоретично визначити цю величину дуже складно, оскільки магнітосферне магнітне поле генерується багатьма динамічними струмовими системами, внесок яких важко врахувати. З метою розв'язання цієї проблеми будують емпіричні моделі поля, які використовують різні методи моделювання і залежать від індексів геомагнітної активності та параметрів сонячного вітру. За допомогою супутникових вимірів величини магнітного поля параметри моделі вибирають таким чином, щоб значення модельного поля максимально наближались до експериментальних даних. Серед емпіричних моделей широкого вжитку набула нова версія моделі Циганенка [3, 4], яка застосовується для визначення поля переважно в хвостовій частині магнітосфери Землі.

Внутрішнє магнітне поле магнітосфери на відстані до  $10R_E$  (радіусів Землі) характеризується сильною нестабільністю. Це пов'язано із наявністю на геоцентричній віддалі  $(4\div 7)10R_E$  великомасштабного західного кільцевого струму з концентрацією густини струму у площині геомагнітного екватора. Моделювання магнітосфери в даній області пов'язане з певними труднощами і викликає особливий інтерес. У даній роботі ми розглядаємо модель Остапенка [1, 2], що є новою емпіричною моделлю для визначення магнітного поля у внутрішній магнітосфері Землі.

Метою нашої роботи є порівняльний аналіз результатів моделювання магнітосферного магнітного поля з використанням емпіричних моделей Остапенка та Циганенка. Дані моделі цікаво порівняти з кількох причин. По-перше, в них використовуються різні методи моделювання. В моделі Остапенка поле формально представляється у вигляді поліноміального розкладу по координатах без визначення струмових систем, що формують дане

поле. А коефіцієнти поліномів, які залежать від індексів геомагнітної та сонячної активності, визначаються за допомогою статистичної обробки супутникових вимірів реального магнітного поля. На основі даних про розподіл поля можна потім визначити струми. В моделі Циганенка, навпаки, спочатку вводяться струмові системи, а вже потім визначається розподіл магнітного поля, що генерується цими струмами. При цьому параметри струмових систем підбираються таким чином, щоб поле, яке вони створюють, збігалось з реальним магнітним полем. Іншою причиною, по якій порівнюються ці моделі, є те, що вони призначені для моделювання різних областей магнітосфери. Модель Остапенка є моделлю внутрішньої частини (до  $10R_E$ ), а модель Циганенка — переважно хвоста магнітосфери. Тому цікаво провести порівняння цих двох моделей у тій області, де вони обидві працюють. Метою порівняння є знаходження тих областей магнітосфери, де значення магнітного поля за обома моделями мало відрізняються одне від одного.

Дослідимо розподіл магнітного поля в ближній частині магнітосфери Землі за моделлю Остапенка та порівняємо результати з результатами останньої версії моделі Циганенка.

#### МОДЕЛЮВАННЯ МАГНІТОСФЕРНОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ ЗА ДОПОМОГОЮ МОДЕЛІ ОСТАПЕНКА

Модель, запропонована у роботі [1] (надалі модель Остапенка-1) — це модель магнітного поля в екваторіальній площині внутрішньої магнітосфери Землі. В рамках даної моделі на основі супутникових спостережень був одержаний емпіричний зв'язок просторового розподілу магнітного поля в екваторіальній області з  $Dst$ -варіацією, міжпланетним магнітним полем (IMF) та динамічним тиском  $P_{dyn}$  сонячного вітру. Для визначення параметрів моделі використовувалися виміри розподілу магнітного поля поблизу екваторіальної площини, отримані супутниками «Експлорер», IMP, ISEE за період 1966—1986 рр. Тут і надалі використовується сонячно-магнітна (SM) система координат. Її вісь  $Z$  антипаралельна осі земного диполя, вісь  $X$  лежить в площині, яка містить лінію Земля—Сонце (додатній напрямок — на Сонце), вісь  $Y$  напрямлена з ранкового сектора на вечірній (рис. 1). Координати точок супутникових вимірювань були обмежені умовами  $|Z| < 2R_E$ ,  $|X| < 10R_E$ ,  $|Y| < 10R_E$ . Тому областю застосування моделі Остапенка є область  $(X^2 + Y^2)^{1/2} < 10R_E$ , тобто круг радіусом  $10R_E$  в площині екватора. На відстанях менше  $3R_E$  було проведено дуже мало вимірювань, тому в цій об-

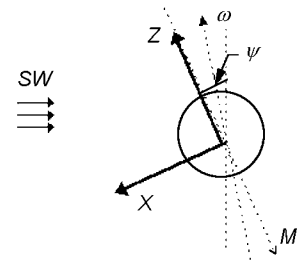


Рис. 1. Система координат SM

ласті досить важко порівнювати отримані результати із спостережуваним полем. Крім того, основний масив даних належить до періодів часу з помірною магнітосферною активністю, тобто  $Dst$  лежить в межах від  $-40$  нТл до  $8$  нТл. Тому для не дуже сильних бур ( $Dst > -100$  нТл) модель ще дає правдоподібну картину розподілу магнітного поля. Більшість вимірювань проводилась при динамічному тиску сонячного вітру в діапазоні  $0 < P_{dyn} < 7$  нПа. За цими межами результати моделювання не є адекватними існуючому полю.

Для опису переважаючої складової магнітного поля в екваторіальній площині використовувалася апроксимація поля поліномом четвертого порядку:

$$B_z(x, y) = S_0 + A_1X + S_1R^2 + S_2R^4, \quad (1)$$

де  $R^2 = X^2 + Y^2$ .

Коефіцієнти полінома знаходилися за допомогою методу найменших квадратів. При аналізі даних про міжпланетне магнітне поле виявилось, що воно не дуже впливає на значення  $B_z$ , тому враховувалася тільки залежність від  $Dst$ -індексу і динамічного тиску сонячного вітру. Коефіцієнти  $S_0$ ,  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $A_1$  визначаються за формулами [1]:

$$\begin{aligned} S_0 &= -27 + 1.0Dst, \\ S_1 &= 0.63 - 0.022Dst, \\ S_2 &= -3.8, \quad A_1 = 1.9P_{dyn}^{0.6}. \end{aligned} \quad (2)$$

На основі емпіричної моделі Остапенка-1 розраховано ізолінії магнітного поля  $B_z$  в екваторіальній площині для різних діапазонів значень  $Dst$  і  $P_{dyn}$ , а також отримано профіль магнітного поля в площині меридіану «день—ніч» і «ранок—вечір». Складова  $B_z$  розраховувалася для різних значень  $Dst$  і  $P_{dyn}$  (рис. 2). При таких же значеннях  $Dst$  і  $P_{dyn}$  розраховувалися профілі збурення магнітного поля (рис. 3).

Результати моделювання добре узгоджуються з фізичними уявленнями про процеси в цій області магнітосфери. Так, з рис. 2 видно, що при збільшенні модуля  $Dst$  ізолінії ущільнюються. Це пояснюється депресією магнітного поля в околі кільцевого струму у зв'язку з підсиленням західного кільцевого струму. Також прослідковується зв'язок

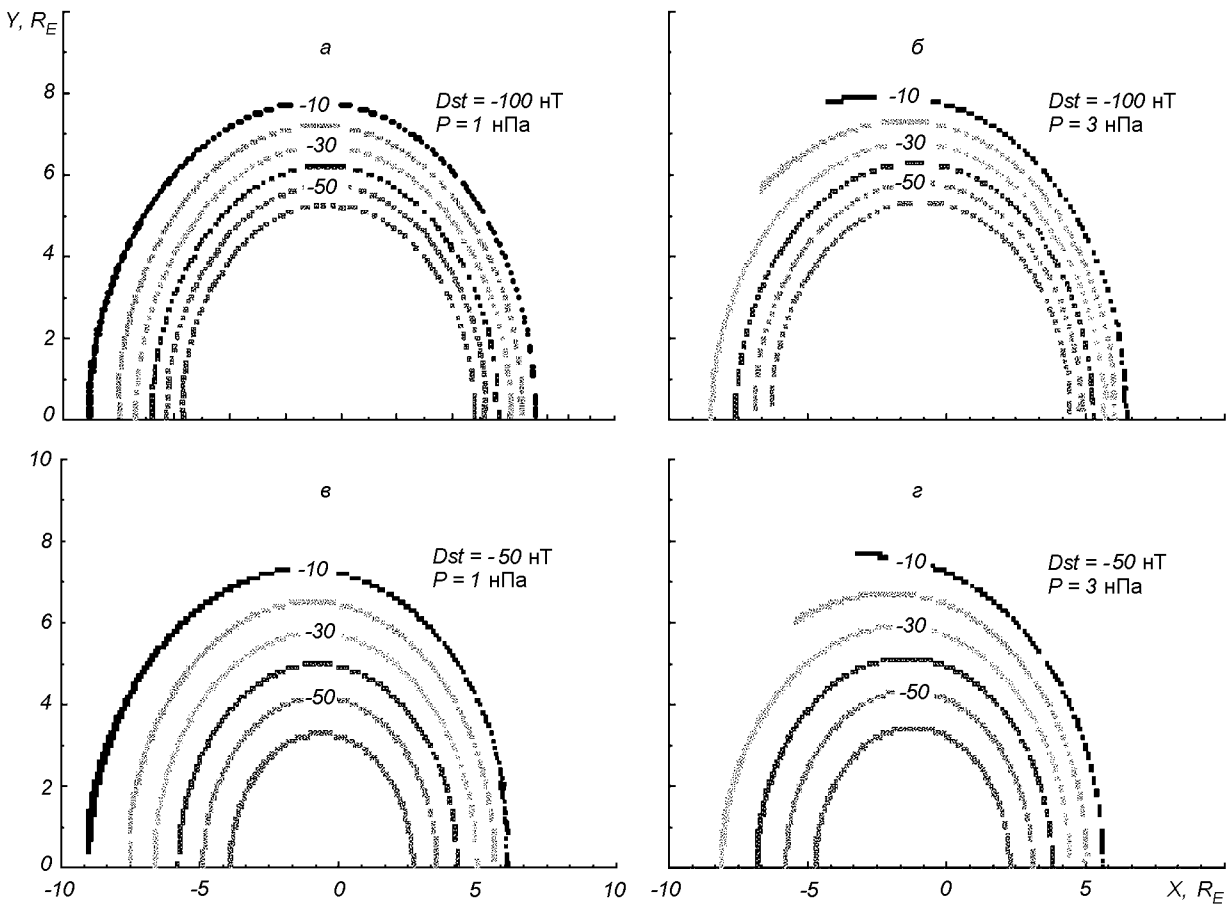


Рис. 2. Ізолнії магнітного збурення в екваторіальній площині, розраховані для різних значень  $Dst$  і  $P_{dyn}$

положення ізолній з параметром сонячної активності — динамічним тиском сонячного вітру. Із збільшенням значення тиску, як і у випадку збільшення модуля  $Dst$ , відбувається підсилення кільцевого струму і ущільнення ізолній. Добре видно залежність величини магнітного поля від  $Dst$  і  $P_{dyn}$  на основі меридіального профілю магнітного збурення (рис. 3). На рис. 3 прослідковується асиметрія «день—ніч» у розподілі магнітного поля. Максимум модуля магнітного збурення  $B_z$  знаходиться на нічній стороні на віддалі порядку земного радіуса.

З результатів моделювання можна зробити висновки, що магнітне збурення в екваторіальній площині внутрішньої частини магнітосфери (до  $10R_E$ ) якісно описується моделлю Остапенка-1 [1] і поведінка модельного поля узгоджується з поведінкою реального магнітного поля.

Розвитком цієї моделі є емпірична модель магнітного поля у внутрішній магнітосфері Землі [2]

(модель Остапенка-2), яка дозволяє розрахувати всі три компоненти вектора магнітного поля в області  $R < 10R_E$ , де  $R^2 = X^2 + Y^2 + Z^2$ . При розробці цієї моделі використовувався масив даних, який налічував більше 20000 трикомпонентних вимірів магнітного поля всередині сфери  $10R_E$  з прив'язкою до індексів геомагнітної та сонячної активності.

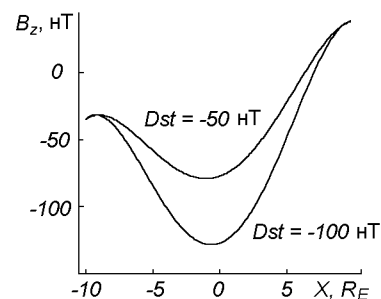


Рис. 3. Розподіл магнітного поля в площині меридіану «день—ніч» ( $Y = 0$ ) за моделлю Остапенка-1

Дана модель враховує, що магнітне поле внутрішньої магнітосфери Землі складається з безструмового (гауссового) поля магнітного диполя Землі та поля, що генерується струмами, які течуть у даній області магнітосфери, переважно великомаштабного західного кільцевого струму. Для моделювання було використано поліноміальний розклад магнітного поля за геоцентричними координатами. У цій моделі передбачалася симетрія полів у напрямку «ранок—вечір», «північ—південь» і враховувалася лише асиметрія «день—ніч».

У рамках моделі  $j$ -складова магнітного поля  $B_j$  представляється у вигляді суми дванадцяти гармонік:

$$B_j = \sum_{i=1}^{12} a_i b_j^i, \quad (3)$$

де  $b_j^i$  — базис, по якому проводиться розклад поля.

Коефіцієнти  $a_i$  визначалися за допомогою методу найменших квадратів. При цьому вони шукалися у вигляді лінійної комбінації від  $Dst$ ,  $AE$ - і  $Kp$ -індексів, динамічного тиску сонячного вітру  $P_{\text{dyn}}$  та  $Z$ -складової міжпланетного магнітного поля [2].

При аналізі отриманих коефіцієнтів  $a_i$  виявилось, що найбільше впливають на поведінку магнітного поля індекси  $Dst$ ,  $Kp$  і  $P_{\text{dyn}}$ , а індекс  $AE$  та компоненти  $IMF$  не дають суттєвого вкладу у величину поля. Тому залежність від параметрів  $AE$  та  $IMF$  була виключена з подальшого розгляду. Як і попередня, дана модель має ряд обмежень. По-перше, на відстанях менше  $3R_E$  було проведено дуже мало експериментальних вимірів магнітного поля. По-друге, основний масив даних зібраний для періодів з помірною активністю. Так, 70 % вимірів проводилися при значеннях  $Dst$  від  $-40$  нТ до  $8$  нТ. Тому модель може застосовуватися в межах від  $3R_E$  до  $10R_E$  і при не дуже сильних бурях  $Dst > -100$  нТ.

#### ПОРІВНЯННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ

Було побудовано модельне магнітне поле за моделлю Остапенка-2 [2] і проведено порівняння із результатами застосування нової моделі Циганенка [3, 4].

У моделі Остапенка-2 обраховувався вектор магнітного поля у заданій точці простору в  $SM$ -системі координат в залежності від  $Dst$ ,  $Kp$  і  $P_{\text{dyn}}$ . Значення середніх величин вхідних параметрів  $\langle X \rangle$  і їх дисперсії  $\sigma_x$  були такими [2]:

$$Dst = -16.3 \pm 23.9 \text{ нТл},$$

$$P_{\text{dyn}} = 2.3 \pm 2.0 \text{ нПа}, \quad Kp = 22.3 \pm 13.8. \quad (4)$$

Для порівняння необхідно, щоб вхідні параметри

обох моделей були однаковими. Так, вхідними параметрами моделі Остапенка-2 є  $Dst$ ,  $P_{\text{dyn}}$ ,  $Kp$ , а моделі Циганенка —  $Dst$ ,  $P_{\text{dyn}}$ , значення міжпланетного магнітного поля  $B_Y$ ,  $B_Z$ , і тілт-кут  $\Psi$  (див. рис. 1). З означення коефіцієнтів розкладу (3) випливає, що в площині  $Z = 0$  ( $SM$ -система координат) розподіл модельного магнітного поля за моделлю Остапенка-2 не залежить від  $Kp$ -індекса. Крім того, в області внутрішньої магнітосфери міжпланетне магнітне поле практично не впливає на поведінку магнітного поля (воно суттєво впливає на зміну поля лише в хвості магнітосфери та в околі магнітопаузи). Щоб виключити залежність від тілт-кута, розрахунок проводився в  $SM$ -системі координат. В результаті цього величини магнітного поля в площині  $Z = 0$  за двома моделями залежали лише від параметрів  $Dst$  і  $P_{\text{dyn}}$ . При цьому, в цій області в моделі Остапенка компоненти  $B_x$ ,  $B_y$  рівні нулю, складова  $B_z$  знаходилася за формулою

$$\begin{aligned} B_z(\rho, \varphi, z) = & a_1 + a_2 3(2z^2 - \rho^2)/2 + \\ & + a_3 5(8z^4 - 24\rho^2 z^2 + 3\rho^4)/8 + \\ & + a_4 \rho^2 + a_5 \rho^4 + a_6 z^4 + a_7 \sqrt{3} \rho \cos \varphi + \\ & + a_8 3\sqrt{10} (z^2 \rho^2 / 4) \cos \varphi + \\ & + a_{10} \rho^3 \cos \varphi - a_{12} 0.5 \rho z^2 \cos \varphi, \end{aligned}$$

де  $\rho$  і  $\varphi$  — координати в циліндричній системі координат. Тому порівняння величин модельного поля проводилося лише для складової  $B_z$  в області від  $4R_E$  до  $10R_E$ , де працюють обидві моделі.

На основі розподілу магнітного поля за двома моделями побудовані профілі поля в площині меридіану «день—ніч» (рис. 4). При невеликих значеннях тиску сонячного вітру (рис. 4, а, б) результати застосування обох моделей добре узгоджуються між собою як у лобовій, так і в хвостовій частині ( $X < 0$ ) магнітосфери. Відносне відхилення складає не більше 20 %. На рис. 4, а, б добре видно положення західного кільцевого струму (в області струму магнітне поле змінює свій знак) на відстані  $8R_E$  від Землі. В області протікання струму модельне магнітне поле не сильно відрізняється за обома моделями. Видно, що до  $8R_E$  (до області кільцевого струму) більше значення магнітного поля дає модель Остапенка, а в області від  $8R_E$  до  $10R_E$  — модель Циганенка.

При більших значеннях тиску сонячного вітру ( $P_{\text{dyn}} = 3$  нПа) (рис. 4, в, г) моделі збігаються у хвостовій частині на відстанях від  $-6R_E$  до  $-10R_E$  (відносне відхилення становить близько 20 %). Але вже на лобовій частині магнітосфери моделі дають дуже велике відносне відхилення ( $> 100$  %). На

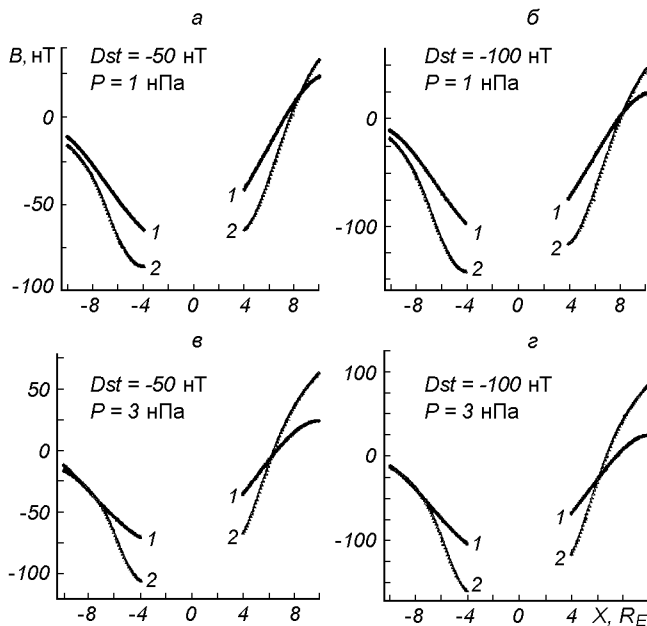


Рис. 4. Профілі магнітного поля в площині меридіана «день—ніч» ( $Y = 0, Z = 0$ ), розраховані для різних значень  $Dst$  і  $P_{dyn}$ : 1 — модель Остапенка, 2 — модель Циганенка

відстані  $10R_E$  модель Циганенка дає в декілька разів більше значення магнітного поля, ніж модель Остапенка. Дана розбіжність пов'язана з тим, що модель Циганенка являється моделлю хвоста. Крім того, в моделі Циганенка не досить добре враховується струм в магнітопаузі і тому дана модель може давати завищені значення магнітного поля для лобової частини магнітосфери.

З рис. 4 добре видно динаміку поведінки західного кільцевого струму. Так, при збільшенні тиску сонячного вітру область, в якій тече кільцевий струм, наближається до Землі (при  $P_{dyn} = 1$  нПа положення струмової області — біля  $7R_E$ , а при  $P_{dyn} = 3$  нПа — область  $6R_E$ ). Це добре узгоджується уявленнями про фізичні процеси в даній області. Так, при збільшенні тиску сонячний вітер інтенсивніше обтікає магнітосферу, і за рахунок цього виникає підсилення і зміщення струмової області до Землі. Також видно, що поблизу Землі ( $\approx 4-5R_E$ ) модель Циганенка дає більше абсолютне значення магнітного поля, ніж модель Остапенка. Це також пов'язано з тим, що модель Циганенка є моделлю хвоста, і погано працює поблизу Землі.

Для з'ясування того, яка з цих двох моделей краще описує магнітне поле в області внутрішньої магнітосфери, планується провести порівняння результатів моделювання з експериментальними да-

ними по магнітному полю, одержаними за допомогою супутника «Інтербол-1».

#### ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

У роботі досліджено розподіл магнітного поля за моделлю Остапенка в ближній частині магнітосфери Землі і вперше проаналізовано відмінності з моделлю Циганенка. Головні результати роботи такі:

1. За моделлю Остапенка-1 побудовані ізолінії магнітного збурення в екваторіальній площині та якісно прослідкована поведінка поля в залежності від рівня геомагнітної активності. Показано, що моделі якісно узгоджуються з динамікою магнітосферного магнітного поля при зміні  $Dst$  і  $P_{dyn}$ .

2. Проведено порівняння модельного магнітного поля за моделями Остапенка-2 і Циганенка 1996 р. у внутрішній області магнітосфери, на геоцентричних відстанях від  $4R_E$  до  $10R_E$  в площині екватору SM-системи координат. Показано, що моделі добре узгоджуються між собою за умов слабкої збуреності магнітосфери. Відносне відхилення у оцінках величини магнітного поля становить близько 20%. У діапазоні геоцентричних відстаней до  $8R_E$  (до області кільцевого струму) модель Остапенка дає більше значення магнітного поля, а в області від  $8R_E$  до  $10R_E$  більше значення магнітного поля дає модель Циганенка.

3. З'ясовано, що при збільшенні динамічного тиску до 3 нПа результати моделювання збігаються у хвості магнітосфери і відрізняються в кілька разів у лобовій частині магнітосфери. Це можна пов'язати з неадекватним представленням струму поблизу магнітопаузи або з непридатністю моделі Циганенка для опису магнітного поля на денній частині магнітосфери.

4. Прослідковано динаміку західного кільцевого струму в залежності від тиску сонячного вітру. Показано, що зі збільшенням  $P_{dyn}$  область кільцевого струму наближається до Землі.

Таким чином, можна впевнено застосовувати емпіричне моделювання при аналізі даних вимірювань, які проводяться в антисонячній частині внутрішньої магнітосфери Землі. Відмінності у результатах моделювання спостерігаються у денній частині приекваторіальної магнітосфери, особливо поблизу магнітопаузи. Це означає, що результати емпіричного моделювання для цієї області слід використовувати з обережністю. Краще користуватись емпіричними моделями, розробленими саме для околу магнітопаузи.

З'ясовано, що всередині околу кільцевого струму

модель Остапенка дає більше значення для величини магнітного поля, ніж модель Циганенка, а зовні цього околу — навпаки. Порівняння з експериментальними даними дозволить з'ясувати, на яку модель краще спиратись при аналізі результатів вимірювання в кожній з цих областей.

Автори вдячні В. М. Івченку за підтримку та обговорення наукових результатів.

Робота частково підтримувалась державними контрактами 2.1.2-98(8) та «Центр-1» з Національним космічним агентством України.

1. Остапенко О. О., Мальцев Ю. П., Мальков М. В. Эмпирическая модель магнитного поля в экваториальной плоскости внутренней магнитосферы // Геомагнетизм и аэрономия.—1996.—36, № 2.—С. 131.
2. Остапенко О. О., Мальцев Ю. П., Мальков М. В. Модель магнитного поля во внутренней магнитосфере Земли // Геомагнетизм и аэрономия.—1996.—36, № 5.—С. 35.
3. Tsyganenko N. A. Modeling the Earth's magnetospheric mag-

netic field confined within a realistic magnetopause // J. Geophys. Res.—1995.—100A, N 4.—P. 5599.

4. Tsyganenko N. A. and Stern D. P. A new-generation global magnetosphere field model, based on spacecraft magnetometer data // ISTP Newsletter.—1996.—6, N 1.—P. 21.

---

#### COMPARISON OF EMPIRICAL MODELS OF THE EARTH'S INNER MAGNETOSPHERE

O. P. Verkhoglyadova and M. G. Panchenko

Comparison of empirical models of the magnetospheric magnetic field elaborated by Ostapenko and by Tsyganenko for the inner magnetosphere is made. Under conditions of weak disturbance, both models show good coincidence near the Earth's magnetic dipole equator plane for geocentric distances from 4 to 10 Earth radii ( $R_E$ ). The Ostapenko model predicts stronger fields up to the ring current region ( $8R_E$ ), and the Tsyganenko model gives stronger fields outside this region. The models diverge in the subsolar region and near the Earth as the solar wind pressure increases.