

УДК 551.510.537

Дослідження меж застосування моделі Остапенка до моделювання магнітного поля у внутрішній магнітосфері Землі

О. П. Верхоглядова, М. Г. Панченко

Київський університет імені Тараса Шевченка
03022, Київ, пр. Глушкова 6

При аналізі даних супутникових вимірювань виникає проблема адекватного моделювання магнітного поля у внутрішній магнітосфері Землі. Дана робота присвячена пошуку просторових областей магнітосфери, у яких величина модельної індукції магнітного поля, обчислена за моделлю Остапенка, узгоджується з експериментальними даними магнітометричних вимірювань супутника «Інтербол-1» за 1997 р. Модель адекватно визначає абсолютне значення індукції магнітного поля на геоцентричних відстанях $8-13R_E$ і при $|Z| > 4R_E$ (крім авроральних областей та околу магнітопаузи).

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДЕЛОВ ПРИМЕНИМОСТИ МОДЕЛИ ОСТАПЕНКО К МОДЕЛИРОВАНИЮ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ВО ВНУТРЕННЕЙ МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ, Верхоглядова О. П., Панченко М. Г. — При анализе данных спутниковых измерений возникает проблема адекватного моделирования магнитного поля во внутренней магнитосфере Земли. Данная работа посвящена поиску пространственных областей магнитосферы, в которых величина модельной индукции магнитного поля, вычисленная по модели Остапенко, согласуется с экспериментальными данными магнитометрических измерений спутника «Интербол-1» за 1997 г. Модель адекватно определяет абсолютное значение индукции магнитного поля на геоцентрических расстояниях $8-13R_E$ и при $|Z| > 4R_E$ (кроме авроральных областей и окрестностей магнитопаузы).

STUDY OF THE APPLICABILITY OF THE OSTAPENKO MODEL TO MODELING MAGNETIC FIELD IN THE INNER MAGNETOSPHERE OF THE EARTH, by Verkhoglyadova O. P., Panchenko M. G. — Analysis of satellite data raises the problem of modeling magnetic field in the inner magnetosphere of the Earth. This study deals with those magnetosphere regions where the Ostapenko model values are in good agreement with experimental data. The measurements made with Interball-1 in 1997 are used. It was found that the model is applicable for geocentric distances $8-13 R_E$ and for $|Z| > 4R_E$. The model fails for the aurora regions and the magnetopause vicinity.

ВСТУП

Для багатьох задач фізики магнітосфери та потреб аналізу даних космічних експериментів необхідно знати величину індукції магнітного поля в тій чи

іншій точці навколоземного простору. Так, маючи модель магнітного поля Землі, за динамікою зміни параметрів, визначених на поверхні Землі (індекси D_{st} , K_p , AE і т. д.) та на борту супутників (параметри сонячного вітру), можна прогнозувати різні явища в ближньому космосі, такі як авроральні висипання частинок та іоносферні збурення. Це дає змогу передбачувати вплив цих збурень, наприклад, на космічний зв'язок та на роботу космічних апаратів. Знання поведінки магнітного поля є суттєвим фактором для прогнозування «космічної погоди», що має важливе прикладне значення.

Теоретично визначити розподіл індукції магнітосферного магнітного поля досить складно, оскільки це 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 індукції магнітного поля параметри моделі вибирають таким чином, щоб значення модельного поля максимально наближались до експериментальних даних [1]. Особливо важко побудувати модель внутрішньої магнітосфери, бо магнітне поле на відстані до $10R_3$ (R_3 — радіус Землі) характеризується сильною нестабільністю. Це пов'язано із наявністю на геоцентричній відстані $4\text{--}7R_3$ великомасштабного західного кільцевого струму з концентрацією густини струму у площині геомагнітного екватора та струмів у іоносфері. Тому моделювання магнітосфери в даній області викликає особливий інтерес. Модель Остапенка [1, 2] є новою емпіричною моделлю для визначення магнітного поля у внутрішній магнітосфері Землі. З проблемами її використання і пов'язана дана робота.

При застосуванні певної моделі для тих чи інших областей магнітосфери Землі потрібно знати, в яких областях і при яких параметрах модельний розподіл близький до дійсного. Для цього модельні значення порівнюються з експериментальними, проведеними за допомогою супутників.

Метою роботи є визначення областей внутрішньої магнітосфери, в яких емпірична модель Остапенка [2] добре узгоджується з результатами вимірювань супутника «Інтербол-1».

У задачі роботи входить обробка та аналіз магнітометричних вимірювань супутника «Інтербол-1» за 1997 р., дослідження розподілу магнітного поля за моделлю Остапенка-1996 і порівняння результатів моделювання магнітного поля у внутрішній магнітосфері Землі з експериментальними даними.

МЕТОДИКА ПОРІВНЯННЯ МОДЕЛЬНИХ ЗНАЧЕНЬ ІНДУКЦІЇ МАГНІТНОГО ПОЛЯ З ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИМИ ДАНИМИ

Побудова динамічних моделей магнітного поля ґрунтується на врахуванні глобальних струмових систем, що існують у магнітосфері. Модель Остапенка [1, 2] дозволяє розрахувати магнітне поле внутрішньої магнітосфери Землі, яке складається з безструмового (гауссового) поля магнітного диполя та поля, що генерується великомасштабним західним кільцевим струмом. Дана модель обчислює три компоненти вектора індукції магнітного поля в області, яка представляє собою сферу радіуса $10R_3$. Магнітосфера зазнає збурень під впливом сонячного вітру. Тому динамічні моделі магнітного поля Землі повинні залежати від параметрів геомагнітної активності і від тиску сонячного вітру та міжпланетного магнітного поля. Коефіцієнти моделі Остапенка представляються у вигляді лінійної комбінації індексів геомагнітної активності (D_{st} , AE і K_p), динамічного тиску сонячного вітру

P_d та z -складової індукції міжпланетного магнітного поля. У моделі передбачається симетрія поля у напрямку ранок—вечір, північ—південь і враховується лише асиметрія день—ніч. Дана модель має ряд обмежень. По-перше, вона не працює на геоцентричних відстанях $R < 3R_3$. По-друге, основний масив даних, які покладено в основу моделі, зібраний для періодів з помірною активністю. Тому модель може застосовуватися в межах від $3R_3$ до $10R_3$ і при не дуже сильних бурях $D_{st} > -200$ нТл.

При порівнянні результатів моделювання з експериментальними даними виникає декілька проблем. По перше, потрібно, щоб вимірювання індукції магнітного поля проводилися в точках, які щільно і рівномірно заповнюють певну просторову область. Тому при використанні даних одного супутника необхідно накопичити великий масив даних за довгий проміжок часу. Друга проблема полягає у виборі методики порівняння. Можна оцінювати точність моделювання, визначаючи відхилення модельної силової лінії від реальної і подовжуючи її до іоносфери [4]. У даній роботі пропонується ґрунтуватися на вимірюваннях *in situ* і порівнювати усереднені в деякій області простору абсолютні величини індукції модельного та реального магнітного полів. Результат порівняння (відносну різницю) можна подати у вигляді «зрізів» по відповідних координатах, наприклад, при фіксованому значенні координати Z обчислювати різницю між модельним та реальним магнітним полем у площині XY системи координат. Тут і надалі використовується сонячно-магнітна (SM) система координат з віссю Z , антипаралельною осі земного диполя, віссю X , що лежить у площині, яка містить лінію Земля—Сонце (додатний напрямок — на Сонце), та віссю Y , що напрямлена з ранку на вечір.

Для оцінки адекватності моделі Остапенка використовувалися такі дані: компоненти індукції магнітного поля (в SM-системі координат) виміряні з борту супутника «Інтербол-1» [3] у відповідні моменти часу, координати супутника в ці моменти, часові значення індексів D_{st} , трьохгодинні індекси K_p та значення динамічного тиску сонячного вітру. При цьому оброблялися дані, які були одержані на геоцентричних відстанях $3\text{--}10R_3$. Значення індукції магнітного поля вибиралися з масиву ключових параметрів супутника за весь період 1997 р.; при цьому виміри за деякі проміжки часу були відсутніми. Основний масив магнітометричних даних відповідав періодам помірної активності ($1 \text{ нПа} < P_d < 3 \text{ нПа}$). Аналізуючи розподіл модельного магнітного поля, можна прийти до висновку, що дана модель не дуже сильно залежить від значення тиску сонячного вітру. Тобто, при невеликій варіації P_d модельний розподіл практично не змінюється. Тому при порівнянні результатів моделювання з експериментальними даними аналізувалися лише вимірювання, які відповідають $P_d = 1\text{--}3$ нПа, а модельне поле розраховувалося при значенні тиску $P_d = 3$ нПа.

Магнітометричні дані містять у собі різноманітні флуктуації, що пов'язані як з похибками вимірювань, так і з хвильовими процесами. Оскільки в модельному полі ці флуктуації не враховані, то виникає потреба усереднювати дані. Фільтрація проводилася на кожному неперервному 20-хвилинному інтервалі.

У роботі аналізувалися вимірювання на ділянках траєкторії супутника, які нерівномірно заповнюють досліджувану область. Тому для коректного порівняння з модельним полем, а також для можливості візуалізації результатів область $X = -10\text{--}10R_3$, $Y = -10\text{--}10R_3$, $Z = -10\text{--}10R_3$ рівномірно розбивалася на елементарні об'єми $1R_3^3$, в яких проводилося усереднення. Індукція магнітного поля за моделлю Остапенка розраховувалась в тих самих точках і при тих самих значеннях індексів геомагнітної активності, що і вимірювання супутника. Модельне поле теж усереднювалося у відповідних областях.

Результат порівняння представляється у вигляді відносного відхилення модельної індукції магнітного поля від її експериментального значення:

$$\Delta B = \frac{|B_e - B_m|}{B_{\min}}, \quad (1)$$

де B_e — модуль індукції магнітного поля, що визначається експериментально, B_m — модельне значення, $B_{\min} = \min(B_e, B_m)$.

Результат порівняння наочно представляється у вигляді «зрізів» по Z -координаті, тобто розподілу ΔB в певній області площини XY при фіксованому значенні координати Z .

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

В результаті обробки більш ніж 15000 вимірів та оцінки відносного відхилення модельної індукції магнітного поля від її експериментального значення отримані розподіли цього відхилення у кубі $X = -10...10R_3$, $Y = -10...10R_3$, $Z = -10...10R_3$. З рис. 1, *a–в* видно, що просторовий розподіл вимірювань магнітного поля в даній області виявився нерівномірним, оскільки орбіта має великий ексцентриситет і області внутрішньої магнітосфери супутник проходить з великою швидкістю. Найбільше вимірювань було зроблено в області $Z = -5...-8R_3$, для якої можна провести більш повний аналіз.

На рис. 2 приведено відношення модулів експериментального та модельного значень індукції магнітного поля. Видно, що модель досить добре працює при геоцентричних відстанях від $8R_3$ до $13R_3$. При наближенні до Землі модельний розподіл перестає узгоджуватися з експериментальним, в областях $R = 2...5R_3$ відносна розбіжність стає досить великою (декілька десятків разів), а при $R = 5...8R_3$ розбіжність складає декілька разів. Розглянемо докладніше розподіли ΔB у площині XY при різних значеннях

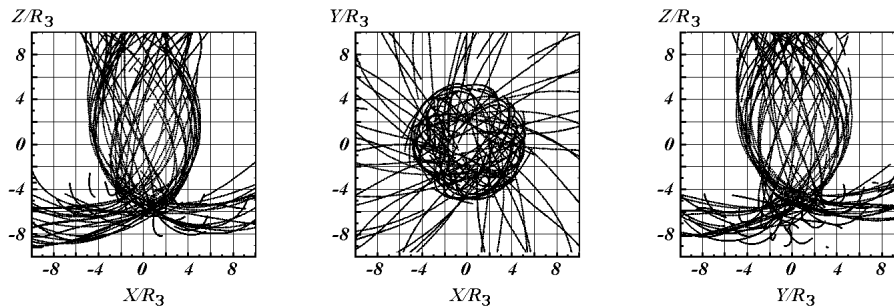
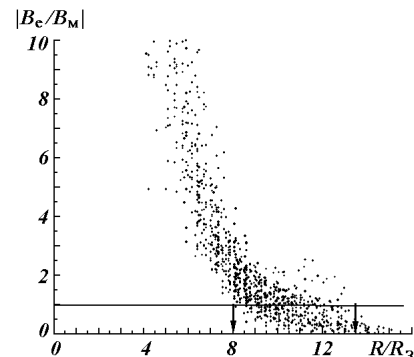


Рис. 1. Проекції траєкторії супутника «Інтербол-1» за 1997 р. на площини XZ , XY , YZ системи координат SM

Рис. 2. Відношення модельних та експериментальних значень індукції магнітного поля в залежності від геоцентричної відстані



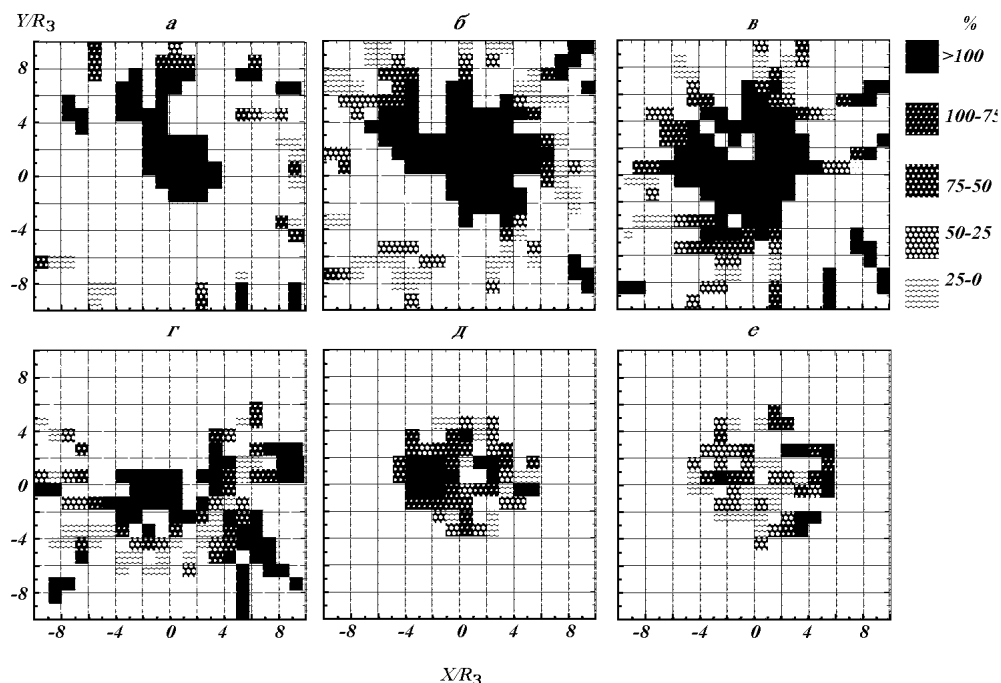


Рис. 3. Розподіли відносного відхилення модельного значення індукції магнітного поля від експериментального (1) при різних значеннях координати Z ($-4, -5, -6, -7, 8$ і $9 R_3$ — відповідно фрагменти a — e) системи координат SM

координати Z . З рис. 3, a — $г$ випливає, що при віддаленні від Землі при $R > 5R_3$ і $Z = -4 \dots -8R_3$ з'являються області, де модель добре працює. В основному ці області знаходяться на нічному боці при $X = -6 \dots -10R_3$. Можна помітити одну особливість: модель не працює в області полярного каспу. При віддаленні від Землі розміри області над полярними районами, де модель не працює, починають зменшуватися. Так, при $Z = -5R_3$ дана область має радіус порядку $6R_3$, а при $Z = -7R_3$ він складає $4R_3$. Також це має місце і при $Z = 8R_3$, а вже при $Z = 9R_3$ ця область повністю зникає (рис. 3, $д, е$). На діаграмах добре прослідковується асиметрія день—ніч. На нічному боці модель працює до $X = -10R_3$, а на денному боці з'являються області розбіжностей між модельним та реальним полем. Так, вже при $Z = -6R_3$ на відстані $X = 8R_3$ модельні значення не збігаються з експериментальними. Ця область збільшується у розмірах при віддаленні від Землі та при збільшенні Z . При $Z = -8R_3$ така область з'являється і на нічному боці. Існування таких областей можна пояснити тим, що при збільшенні Z деякі ділянки спостережуваної області попадають в окіл магнітопаузи (геоцентрична відстань близько $10R_3$). Остання являє собою складну перехідну область, в якій для побудови адекватного модельного розподілу магнітного поля необхідно враховувати струм Чепмена—Ферраро. Авроральні області дуже чутливі до різноманітних збурень магнітосфери, і моделювання магнітного поля в них є досить складною проблемою. Тому точність обрахунків модельного поля за допомогою моделі Остапенка невисока.

ВИСНОВКИ

Модель Остапенка найкраще узгоджується з експериментальними даними на геоцентричних відстанях $8 \dots 13R_3$ в областях, які віддалені від високоширотних регіонів магнітосфери та магнітопаузи. Відносне відхилення стано-

виль 25—50 %. У високоширотних областях модель погано працює до $|Z| = 8R_3$ (відносне відхилення понад 100 %). При віддаленні від Землі при $|Z| > 5R_3$ з'являються області на денному боці (під магнітопаузою), де відносне відхилення також перевищує 100 %. При $|Z| > 8R_3$ такі області з'являються і на нічному боці. Звичайно, ми визначили просторові межі застосування моделі Остапенка лише у певних просторових областях, які відповідають вибраним ділянкам орбіти супутника (рис. 1).

Отже, модель адекватна на геоцентричних відстанях $8—13R_3$ і $|Z| > 4R_3$ (крім авроральних областей та околу магнітопаузи).

Автори вдячні В. М. Івченку (Київський університет, Україна) та Я. Ханашу (Астрономічний центр ім. М. Коперника, Торунь, Польща) за цікавість до роботи та обговорення.

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—134.
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—41.
3. Klimov S., Romanov S., Amata E., et al. ASPI experiment: measurements of fields and waves onboard the INTERBALL-1 spacecraft // Ann. Geophys.—1997.—15.—P. 514—527.
4. Pulkkinen T. I. Testing the accuracy of magnetospheric model field line mapping // J. Geophys. Res.—1996.—101, N A12.—P. 27431—27442.
5. Stern D. P. The art of mapping the magnetosphere // J. Geophys. Res. 1994.—99, N A9.—P. 17169—17198.

Надійшла до редакції 06.09.99