

УДК 533.951+523.6

**Методика визначення положення областей  
магнітосфери за даними вимірювань  
космічних апаратів: експериментальні критерії  
та емпіричне моделювання**

**О. П. Верхоглядова, В. М. Івченко**

Київський університет імені Тараса Шевченка

*Надійшла до редакції 26.12.97*

---

Систематизовано методи обробки та попереднього аналізу супутникових вимірювань в магнітосфері Землі. Приділяється увага аналізу даних з точки зору їх фізичного змісту та врахування характеристик областей магнітосфери, де проводилися ці вимірювання, тобто проблемам локалізації, прогнозування та моделювання. Запропоновано систематизований огляд найвживаніших експериментальних критеріїв, емпіричних моделей та домовленостей про характерні риси головних областей магнітосфери і наведено схему етапів аналізу даних супутникових наукових експериментів. Робота виконана в процесі обробки даних міжнародного космічного проекту «Інтербол-1» (хвостовий) і містить приклади аналізу оригінальних даних.

---

**ВСТУП**

Обробка даних магнітосферних вимірювань має своєю кінцевою метою одержання фізичних параметрів, які характеризують вибрану область магнітосфери. Існуючі моделі магнітосфери досить добре описують внутрішні її частини, а також глобальну структуру в період невеликих збурень. Однак магнітосфера є динамічним утворенням, де проходять складні процеси, які неможливо описати глобальними моделями. Для побудови фізичної картини того чи іншого явища недостатньо аналізу безпосередніх вимірювань, необхідно використати всі супутні дані (орбітальні, дані про сонячну та геоактивність, параметри сонячного вітру та міжпланетного магнітного поля, значення параметрів магнітного поля на поверхні Землі, іоносферні дані і т. д.) та порівнювати їх з модельними значеннями. Різні частини магнітосфери характеризуються суттєво різними процесами та значеннями фізичних параметрів, тому важливе значення має ідентифікація положення КА в магнітосфері. Знання

орбітальних параметрів для цього недостатньо, необхідно використати модельні значення та коригувати положення КА за даними вимірювань, знаючи поведінку вимірюваних параметрів для певної області магнітосфери.

Автори розглядають проміжну ланку між власне обробкою телеметричної інформації та використанням експериментальних даних у побудові теоретичних моделей. Цьому етапу обробки та аналізу даних присвячено багато робіт, проте в них відсутній системний підхід та бракує окреслення етапності робіт. Ми зупинимось на фізичному змісті даних та врахуванні областей магнітосфери, де проводилися ці вимірювання. Такий підхід реалізується шляхом поєднання експериментальних критеріїв та емпіричних моделей.

**ЗАДАЧА ЛОКАЛІЗАЦІЇ**

У процесі обробки даних супутникових експериментів виникають проблеми визначення положення

КА відносно різних областей магнітосфери, прогнозування проходження КА через конкретну область та моделювання розподілу фізичних величин і їх динаміки у зв'язку зі змінами в сонячному вітрі. Розв'язуючи ці проблеми, ми зможемо, по-перше, оцінювати результати вимірювань, орієнтуючись на фонові або типові значення фізичних величин для досліджуваних областей магнітосфери, по-друге, виділити в експериментальних даних типові просторові розподіли та процеси, що характерні для цих областей. Зворотний зв'язок реалізується шляхом покращення існуючих моделей на основі експериментальних результатів.

При аналізі отриманих експериментальних даних та пошуку певних плазмових процесів необхідно спочатку з'ясувати, в яких областях магнітосфери знаходиться апарат, або які ділянки траєкторії супутника припадають на потрібну область. Координати КА відносно Землі задані на всьому досліджуваному інтервалі. Задача першого типу постає перед нами, наприклад, тоді, коли ми досліджуємо зв'язок між процесами, що зареєстровані у певний проміжок часу за наземними даними (геомагнітна буря), на Сонці (корональний транзієнт, спалах) або за даними інших супутників, зокрема у сонячному вітрі (проходження магнітного збурення), і даними вимірювань КА. Звичайно, фізичні процеси збурення та відновлення в різних областях магнітосфери проходять по-різному.

З проблемою другого типу стикаються, зокрема, у випадку дослідження властивостей певної області магнітосфери (авроральна область, пограничні шари поблизу магнітопаузи тощо) при її перетинах космічним апаратом. При цьому буває бажано дослідити як просторовий розподіл певних фізичних параметрів, так і його еволюцію з часом.

Таким чином, можна сформулювати задачу локалізації як визначення положення космічного апарата відносно певних областей магнітосфери з метою виділення відомих процесів та характерної поведінки фізичних величин, і порівняння з типовими значеннями параметрів магнітосферної плазми у цих областях. Наведемо певні ознаки, що дають змогу за даними експерименту визначити локалізацію КА в певній області хвоста магнітосфери.

#### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ КРИТЕРІЇ

Протягом 1960-х років на основі результатів космічних експериментів була побудована модель хвоста магнітосфери Землі: дві долі, обмежені магнітопаузою та розділені плазмовим шаром. Було

з'ясовано, що плазмовий шар характеризується суттєвою депресією сумарного магнітного поля та домінуючою складовою  $B_z$  з переважно північним напрямком на відстанях  $-70R_E \leq X \leq -20R_E$  [6]. Надалі ми користуємось системою координат GSM (гео-сонячно-магнітною) у якій вісь  $X$  напрямлена до Сонця, вісь  $Z$  вибрана таким чином, що вісь геомагнітного диполя лежить у площині  $XZ$ . Відхилення осі геомагнітного диполя від осі  $Z$  задається кутом  $\Psi$ , який зазнає періодичних добових та сезонних змін. Згідно з результатами КА ISEE-3 для визначення того, в якій області хвоста на відстанях  $-220R_E \leq X \leq -80R_E$  проводяться вимірювання, достатньо лише даних по магнітному полю [15, 35]. Нещодавно за допомогою КА GEOTAIL досліджена структура хвоста магнітосфери на відстанях до  $X \geq -50R_E$  [38]. За даними експериментів долі хвоста характеризуються відносно високим значенням магнітного поля у порівнянні з плазмовим шаром і відповідною орієнтацією. Якщо ввести широтний кут  $\theta = \arcsin(B_z/|B|)$  (між віссю  $X$  та складовою вектора магнітного поля у площині  $XY$ ) та азимутальний кут  $\psi = \arctg(B_y/B_x)$  (між віссю  $X$  та складовою вектора магнітного поля у площині  $XZ$ ), то значення  $\psi = 0$  відповідає північній ( $B_x > 0$ ), а  $\psi = \pi$  — південній ( $B_x < 0$ ) долям хвоста відповідно. При переході від долей до області плазмового шару депресія величини магнітного поля може становити 50—70 %. При перетині нейтрального шару вектор магнітного поля поступово обертається ( $B_x$  змінює знак). У плазмовому шарі можуть спостерігатися істотні значення  $B_y$ , які пов'язані зі згинами (bending) та скручуванням (twisting) струмового шару [26, 32]. Північна орієнтація магнітного поля ( $B_z > 0$ ,  $\theta > 0$ ) в середньому характерна для відстаней  $-80R_E \leq X \leq -40R_E$  у плазмовому шарі та інколи навіть для  $-150R_E \leq X$  і узгоджується з орієнтацією поля поблизу  $X = -10R_E$ , що спричиняється західним кільцевим струмом [3].

На рис. 1, а наведено приклад даних вимірювань магнітного поля на борту хвостового зонда КА «Інтербол». Показано модуль магнітного поля (суцільна лінія),  $B_x$  та  $B_z$  (штрихами та точками). Видно перехід від північної долі хвоста до плазмового шару та перетин нейтрального шару (показано стрілкою). КА на цій ділянці траєкторії знаходився у вранішньому секторі магнітосфери ( $-17R_E \leq X \leq -5R_E$ ,  $Y < 0$ ) і рухався до Землі. На рис. 1, б показано поведінку модуля магнітного поля (суцільна лінія) та  $B_x$  компоненти (штрихова лінія) при виході КА з магнітосфери у сонячний вітер.

Магнітосфера — динамічне утворення, і її реальна конфігурація за певних умов може відрізнятися

від класичної моделі. Наявність високошвидкісних потоків у сонячному вітрі приводить до зміни напрямку потоків плазми у хвості та відхилення осі хвоста від очікуваного положення [16]. Вертикальні рухи хвоста (flapping) у періоди магнітосферної активності приводять до значних величин  $B_z$  у плазмовому шарі. Орієнтація поля в долях хвоста може змінюватись в межах  $-25^\circ < \psi < 20^\circ$ ,  $-5^\circ < \theta < 10^\circ$  відносно положення площини  $XU$  у системі GSM, причому відхилення максимальні на відстанях  $-50R_E \leq X \leq -10R_E$ . Згідно з гіпотезою утворення нейтральної точки і перез'єднання в далекому хвості магнітосфери під час суббурі, утворення плазмоїдів повинно приводити до локальної зміни знаку  $B_z$  та посилення  $B_y$ . Проходження плазмоїдів поблизу КА також супроводжується анізотропними потоками енергійних іонів та електронів, та цілим комплексом явищ [4] за даними IMP-8 та «Geotail».

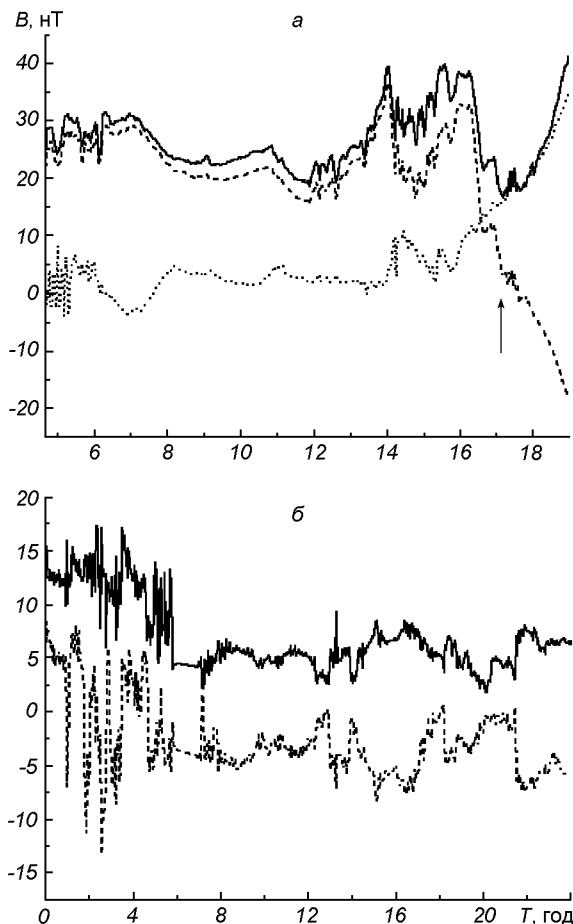


Рис. 1. Дані вимірювань магнітного поля на борту хвостового зонду Інтербол: *a* — від 17 жовтня 1995 р.; *б* — від 15 серпня 1995 р.

Експериментальні критерії у застосовуванні до плазмових даних наведені у роботах [5, 7, 9, 11, 40]. Перетин магнітопаузи супроводжується збільшенням абсолютного значення магнітного поля та зменшенням потокової швидкості плазми. Відомо, що у зовнішній магнітосфері концентрація плазми поступово зменшується при русі КА через магнітошар, низькоширотний пограничний шар, мантию, плазмовий шар та доли хвоста. Магнітошар та плазмовий шар характеризуються відносно великими швидкостями плазми у напрямку в хвіст магнітосфери. При переході від магнітошару до плазмового шару збільшується середня енергія електронів та протонів. Доли хвоста заповнені розрідженою холодною плазмою. Значення фізичних параметрів змінюються в широких межах в залежності від рівня збуреності магнітосфери. Пограничні шари (низькоширотний пограничний шар (LLBL), плазмова мантия та пограничний шар між плазмовим шаром та долями (PSBL)) визначають тоншими методами на основі вимірювань потоків іонів та електронів [7, 11, 40] та низькочастотних флуктуацій магнітного поля [12]. Для плазмового шару характерні потоки високоенергетичних іонів переважно в напрямку хвоста. Ці потоки також проникають назовні і утворюють пограничний шар плазмового шару. У долях хвоста потоки іонів на порядок чи два менші за величиною та мають орієнтацію впоперек силових ліній. У магнітошарі потоки в напрямку від Сонця мають широкий кутовий розподіл і сильно змінюються з часом. Низькоширотний пограничний шар має середню концентрацію іонів близько  $0.1 \text{ см}^{-3}$ , доли хвоста —  $0.01 \text{ см}^{-3}$ , а плазмовий шар — понад  $1 \text{ см}^{-3}$ .

У роботах [7, 11] розроблені експериментальні критерії ідентифікації плазмових режимів на основі даних КА «Geotail» з часовим розділенням близько 1 хв. Автори зауважують, що термін «режим» є більш адекватним для процедури ідентифікації, оскільки КА протягом тривалого часу може зареєструвати прояви майже всіх плазмових режимів в одній і тій самій просторовій області хвоста магнітосфери. Вони виділяють п'ять основних режимів: плазмовий шар, доли хвоста, пограничні шари (BL), магнетошар та сонячний вітер. Характерні риси цих плазмових режимів наведено у табл. 1.

Таким чином, використовуючи експериментальні критерії, розроблені за результатами ISEE-3 та попередніми результатами «Geotail», і аналізуючи дані про магнітне поле, плазму та плазмові хвилі, можна визначити положення КА відносно основних областей хвоста. Слід зауважити, що при інтерпретації даних необхідно враховувати динаміку

Таблиця 1. Характеристика головних плазмових режимів за роботами [7, 11]

Режим	Властивості іонів	Магнітне поле	Властивості електронів
Сонячний вітер	1—8 кеВ, наявність альфа-частинок, потоки іонів напрямлені в хвіст	Сильні зміни в $\varphi$ та $\theta$	Середня енергія нижча, ніж для магнетошару
Магнетошар	0.2—4 кеВ потоки в хвіст	Поле змінне за $\varphi$ та $\theta$ , $\theta$ може значно відрізнятись від 0	Інтенсивний стаціонарний потік < 200 еВ
Пограничний шар (BL)	30 еВ—2 кеВ, потоки переважно в хвіст	В мантії поле мало змінюється за напрямком $\theta$ , а в LLBL поле характеризується переважно малим $\theta$ і зазнає більших змін	Змінний потік меншої інтенсивності < 200 еВ
Плазмовий шар	100 еВ—10 кеВ, потоки в різних напрямках, але переважно в напрямку до Сонця з великим розбігом значень по енергії	Поле переважно зазнає сильних змін за величиною та напрямком, $\theta$ звичайно велике	Енергії 50 еВ—2 кеВ, наявність фотоелектронів
Долі хвоста	Дуже низькі значення потоку, випадкові риси розподілу	Дуже спокійне поле високої амплітуди, $\theta \approx 0$	Чітка реєстрація фотоелектронів

магнітосфери, внаслідок чого може спостерігатися багаторазове входження КА в певні області магнітосфери при монотонній зміні координат.

**ПРОГНОЗУВАННЯ НА ОСНОВІ ЕМПІРИЧНИХ МОДЕЛЕЙ**

З метою прогнозування знаходження космічного апарату в окремих областях магнітосфери моделюють положення ударної хвилі, магнітопаузи, нейтрального шару, аврорального овалу та полярного каспу та ін. при типових значеннях вхідних параметрів. До таких параметрів належать: динамічний тиск сонячного вітру, компоненти його магнітного поля, індекси активності ( $D_{st}$ ,  $K_p$ ,  $A_E$ ) та положення осі геомагнітного диполя відносно нерухомої системи координат. Внутрішні параметри цих моделей визначаються емпіричним шляхом на основі статистичної обробки даних вимірювань КА. Розглянемо деякі найбільш вживані моделі.

Модель [31] широко використовується при визначенні положення магнітопаузи. Вважається, що динамічний тиск сонячного вітру та компонента  $B_z$  міжпланетного магнітного поля (ММП) є визначальними факторами для відстані протисонячної точки магнітопаузи від Землі та форми магнітопаузи. Причому збільшення динамічного тиску приводить до наближення магнітопаузи до Землі та зменшення її об'єму, а наявність південної складової ММП ( $B_z < 0$ ) приводить до розширення області в хвості магнітосфери, яка охоплюється магнітопаузою. Згідно з роботою [31] магнітопауза являє собою частину еліпсоїда обертання, рівняння якого має вигляд

$$AX^2 + BX + C Y^2 + Z^2 = 0, \quad (1)$$

де  $A = 0.14$ ,  $B = 18.2$ ,  $C = -217.2$ , а координати

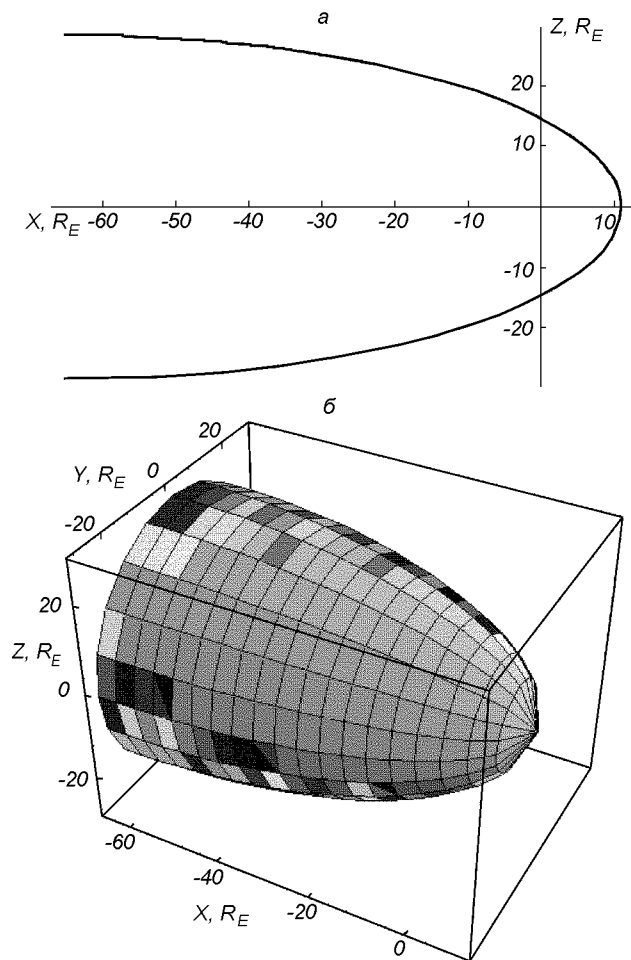


Рис. 2. Модельна магнітопауза, побудована з використанням формул (1): а — перетин площиною XZ; б — тривимірне зображення

Таблиця 2. Коефіцієнти моделі магнітопаузи та ударної хвилі за роботою [14]

Модель	A	B	C	D	E	$X_s$	$Y_1$	$Y_2$
Ударна хвиля	0.0296	-0.0381	-1.280	45.644	-652.10	14.5	-24.9	26.2
Магнітопауза	-0.0942	0.3818	0.498	17.992	-240.12	10.9	-15.7	15.3

наведено у системі GSM в радіусах Землі (рис. 2). Ця модель працює при середньому значенні динамічного тиску сонячного вітру  $1.47 \leq P_{sw} \leq 2.60$  нПа і часто використовується для прогнозування.

Більш досконала модель [30] враховує параметричну залежність від динамічного тиску сонячного вітру та  $B_z$ -складової ММП. Вона застосовується при тонкому аналізі даних при наявності параметрів сонячного вітру за досліджуваний проміжок часу. Тому вона не може бути застосована для прогнозу. Альтернативна модель створена на основі даних ISEE-1, ISEE-2 та IMP-8 і виходить із співвідношення балансу тисків на магнітопаузі [28]. Зараз проводяться дослідження з удосконалення цієї моделі.

Положення ударної хвилі перед магнітопаузою часто визначають за роботою [14]. Автор пропонує описувати магнітопаузу у вигляді ділянки поверхні еліпсоїда, а ударну хвилю — у вигляді гіперболоїда. Обидві граничні поверхні перетинають площину XY по кривих, які задовольняють рівняння

$$Y^2 + AX + BX^2 + CY + DX + E = 0, \quad (2)$$

де  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  задаються в системі GSE в радіусах Землі, а коефіцієнти визначаються на основі експериментальних даних про перетини цих поверхонь, отриманих з шести КА серії IMP.

У табл. 2 наведено середні значення положення  $Y_1$  і  $Y_2$  вранішнього та вечірнього флангів і координату  $X_s$  протисонячної точки в екваторіальній площині [14].

Згідно із сучасною моделлю [18], розробленої на основі даних ISEE-1, величина  $X_s$  складає  $(13.7 \pm 0.2)R_E$  і  $(10.3 \pm 0.3)R_E$  для ударної хвилі та магнітопаузи відповідно. Пропонується моделювати ці поверхні у вигляді ділянок еліпсоїдів обертання, рівняння яких у GSE має вигляд

$$R = -\varepsilon X + \kappa.$$

Коефіцієнти наведено в табл. 3. Моделі магнітопаузи у роботах [14] та [18] можна розглядати як альтернативні.

Положення нейтрального шару часто визначають в термінах «відстані відхилення» (hinging distance) ( $\Delta Z$  — геоцентричної відстані у площині геомагнітного екватора (її нахил до площини екліптики

Таблиця 3. Коефіцієнти до моделі магнітопаузи та ударної хвилі за роботою [18]

Модель	$\varepsilon$	$\kappa$
Ударна хвиля	0.81	24.8
Магнітопауза	0.43	14.7

становить  $\Psi$ ) до області, де нейтральний шар відхиляється від геомагнітного екватора (дипольне поле) і орієнтується за напрямком сонячного вітру. У роботі [17] на основі вимірів КА AMPTE/CCE на геоцентричних відстанях  $5R_E < R < 8.8R_E$  виведено емпіричну формулу, яку зручно використовувати для довгострокових прогнозів:

$$\Delta Z = C \sin^2[A(R - R_0)] \sin \Psi, \quad (3)$$

де

$$A = 5R_E^{-1}, \quad C = 7, \quad R_0 = 4R_E;$$

$\Psi$  — у градусах.

Більш адекватний результат на певній ділянці траєкторії КА за місцевим магнітним часом  $\varphi$  можна отримати з врахуванням не тільки  $\Psi$ , але й рівня магнітосферної збуреності (за  $K_p$ ) [25]:

$$MLAT = -(0.14K_p + 0.69) [\cos \varphi]^{1/3} \times (0.065R^{0.8} - 0.16)\Psi, \quad (4)$$

де  $MLAT$  — нахил нейтрального шару до площини геомагнітного екватора. Кути подано у градусах. Результати розрахунків за формулами (3), (4) та по емпіричній моделі Циганенка від 1989 р. (див. нижче) добре узгоджуються для (4) при проведенні оцінок поблизу Землі для невеликих рівнів геомагнітної активності [27].

Для оцінок незбуреного положення нейтрального шару також використовується модель Гослінга [21, 25]:

$$Z = \begin{cases} [16\sqrt{1 - (Y/Y_0)^2} - 7] \sin \Psi, & |Y| \leq Y_0, \\ -7 \sin \Psi, & |Y| > Y_0, \end{cases} \quad (5)$$

$$Y_0 = 13.5R_E.$$

Ця формула враховує так званий ефект викривлення «warping» [34], тобто той факт, що нейтральний шар не є плоскою поверхнею (див. рис. 3).

У нових версіях моделі Циганенка використо-

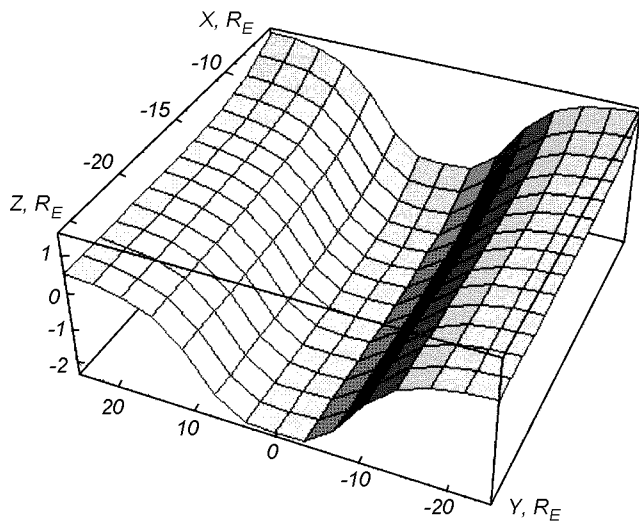


Рис. 3. Модельний нейтральний шар, побудований з використанням формули (6)

вугється така формула для визначення модельного положення нейтрального шару:

$$\Delta Z = 0.5 \operatorname{tg} \Psi \left\{ [(x - R_H \cos \Psi)^2 + (\delta \cos \Psi)^2 - \sqrt{(x + R_H \cos \Psi)^2 + (\delta \cos \Psi)^2}]^{1/2} \right\} - G \sin \Psi \frac{y^4}{y^4 + L_y^4},$$

$$R_H = 8, \quad \delta = 4, \quad G = 10, \quad L_y = 10, \quad (6)$$

де координати наведено у системі координат GSM у  $R_E$ . На відміну від вищезазначених, ця модель враховує залежність від координат  $X$  та  $Y$ .

Моделі (5) та (6) звичайно використовуються для аналізу тонких ефектів, пов'язаних зі збуреннями нейтрального шару. Слід зазначити, що формула (5) застосовується в області ближньої до Землі частини хвоста, а формула (6) — в областях середнього та віддаленого хвоста. У табл. 4 та на рис. 4 наведено приклад порівняння експериментальних даних та результатів моделювання. Деяке відхилення експериментального положення може бути пов'язане з власними рухами нейтрального шару і потребує більш детального аналізу. При аналізі даних слід пам'ятати, що наведені вище емпіричні моделі є результатами статистичної обробки великих масивів експериментальних даних.

Для прогнозування проходження зондів проекту «Інтербол» спеціалістами Інституту космічних досліджень РАН рекомендовано такі домовленості про стаціонарну структуру магнітосфери:

- Внутрішня магнітосфера охоплює область під

Таблиця 4. Порівняння модельних положень нейтрального шару з експериментальними значеннями для двох перетинів 3 листопада 1996 року. Дано моменти перетинів  $T$ , координати КА та відстань від Землі  $R$ , кутові відхилення нейтрального шару  $\alpha_G, \alpha_T, \alpha_e$  у градусах за моделями (5), (6), та за експериментом відповідно

$T, UT$	$X$	$Y$	$Z$	$R$	$\alpha_G$	$\alpha_T$	$\alpha_e$
$10^{\text{h}}29^{\text{m}}$	-22.3	-9.1	2.5	24.2	4.7	1.8	5.9
$15^{\text{h}}59^{\text{m}}$	-19.2	-9.2	-1.2	21.3	1.9	-0.9	-3.2

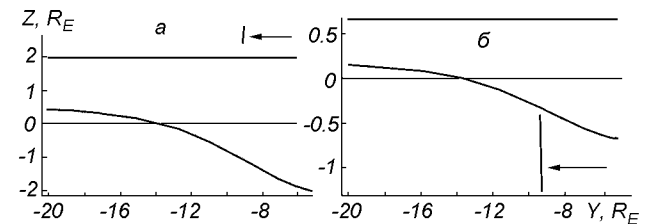


Рис. 4. Модельний нейтральний шар, побудований з використанням формул (5) (горизонтальний відрізок), (6) (крива) та ділянки траєкторії КА «Інтербол-1» (показано стрілкою), на яких спостерігалися перетини нейтрального шару; дані наведені для 3 листопада 1996 року для перетинів:  $a$  —  $10^{\text{h}}29^{\text{m}} UT$ ;  $b$  —  $15^{\text{h}}59^{\text{m}} UT$

магнітопаузою на геоцентричних відстанях менше  $10R_E$ ;

- Граничні шари (низькоширотний граничний шар та мантія) розташовані на відстані менше  $1R_E$  під магнітопаузою;
- Плазмовий шар в поперечному перерізі має розмір  $6R_E$  в центральній частині і  $14R_E$  поблизу хвостової частини магнітопаузи;
- Нейтральний шар товщиною  $1R_E$  займає центральну частину плазмового шару;
- Радіаційні пояси обмежені двома геомагнітними оболонками з параметрами Мак Ілвайна  $L = 1.2R_E$  та  $L = 4.5R_E$ , відповідно;
- Область авроральних силових ліній утворена поверхнями між полярною та екваторіальною границями аврорального овалу і обмежена геоцентричною відстанню  $10R_E$ .

Згідно з сучасними уявленнями [19, 20] області низькоширотної магнітосфери пов'язані з відповідними областями в авроральній магнітосфері та іоносфері. Цей зв'язок фізично обумовлений рухом частинок та поширенням хвильових збурень переважно вздовж магнітних силових ліній. Таким чином, магнітопауза проектується вздовж силових ліній в область каспу, низькоширотний пограничний шар з денної частини магнітосфери — в північну границю аврорального овалу, область максимуму поперечного струму у центральному плазмовому шарі — в південну границю аврорального

овала, пограничний плазмовий шар та мантія — в області дифузних полярних сьйв, північна доля хвоста — в область полярної шапки. В періоди високої магнітосферної активності з'являється область дифузного полярного сьйва на південь від аврорального овала, в яку проектується окіл кільцевого струму. Властивості плазми у пов'язаних областях подібні. Так, характеристики розрідженої плазми над полярною шапкою подібні до плазми долей хвоста, а в області каспу — до плазми магнітного шару зовні магнітопаузи. Звичайно, при врахуванні переносу плазми поперек поля виникає неоднозначність такого проектування.

Для прогнозування розташування каспу моделюється положення магнітопаузи на денній стороні магнітосфери та в хвості, і її проекції вздовж силових ліній на високоширотну область [33]. Іоносферна проекція положення каспу знаходиться в межах від  $79^\circ$  магнітної широти у спокійні періоди до  $74^\circ$  у збурені періоди і змінюється в залежності від часу внаслідок варіацій кута нахилу геомагнітного диполя до осі  $Z$  системи координат  $GSM$  (або кута  $\Psi$ ). Положення аврорального овала також можна визначити проектуванням вздовж силових ліній [13, 41]. При цьому використовуються емпіричні моделі магнітосферного магнітного поля (див. нижче).

Визначення областей магнітосфери на основі значених моделей є орієнтовним і може використовуватися для типових значень вхідних параметрів. Сильні збурення та тонка структура цих областей не відображені у моделях. Тому доцільно поєднувати прогнозування із застосуванням експериментальних критеріїв, які встановлюють типові діапазони параметрів, характерних для певних областей магнітосфери.

Більш гнучка та складна методика полягає у відновленні магнітосферного магнітного поля на певний момент часу в залежності від стану магнітосферної активності та параметрів ММП шляхом моделювання.

#### ЗАДАЧА МОДЕЛЮВАННЯ

Відтворення динамічної структури магнітного поля, розподілу плазми в магнітосфері Землі проводять на основі МГД-моделювання. Для попереднього аналізу експериментальних даних по магнітному полю зручніше користуватись емпіричними моделями, які створені шляхом статистичної обробки бази даних багатьох КА. Ми зупинимось на сучасній удосконаленій версії моделі Циганенка від 1996 р.

Емпіричне моделювання структури магнітосферного магнітного поля традиційно полягає у представленні магнітосфери у вигляді системи провідників зі струмами, яка адекватно відтворює реальні великомасштабні струмові системи [23, 34]. Останні складаються з п'яти компонентів (докладніше див. [3, 22]):

- струми, що складають внутрішнє або «головне» поле Землі;
- струми Чепмена-Ферраро на магнітопаузі;
- кільцевий струм, утворений захопленими частинками;
- струми у хвості магнітосфери, що забезпечують поля долей;
- струми Біркеланда, пов'язані з полярними сьйвами.

Модель Циганенка 1996 р. [36, 37] (надалі Т96) є удосконаленою версією попередніх моделей 1989 р. і розроблена з використанням даних близько 80000 вимірювань супутників серій IMP, HEOS та ISEE протягом 1966—1986 рр. на геліоцентричних відстанях  $4R_E$ — $70R_E$ .

Відомо, що основний внесок в енергетику процесів у навколоземному космічному просторі вносить сонячна активність. Важливим фактором такого впливу є сонячний вітер. Його фізичні параметри (тиск, швидкість потоку плазми, вморожене магнітне поле) та їх зміни визначають форму та процеси в магнітосфері Землі. Тому вхідними параметрами моделі Т96 є динамічний тиск сонячного вітру  $P_{\text{dyn}}$ , АЕ та  $D_{\text{st}}$  індекси геомагнітної активності, поперечні компоненти  $B_y$  та  $B_z$  ММП, кут нахилу геомагнітного диполя  $\Psi$ . На виході моделі отримується вектор магнітосферного магнітного поля відносно вибраної системи координат у вибраній точці простору в певний момент часу. Таким чином, можна побудувати миттєву мапу силових ліній магнітного поля при заданих умовах в сонячному вітрі (рис. 5).

Форма та положення магнітопаузи визначається  $P_{\text{dyn}}$ , як і в роботі [31], причому еліпсоїдальна частина магнітопаузи на відстанях  $X \leq -60R_E$  гладко переходить у циліндричну поверхню. У новій моделі завдяки залежності від  $D_{\text{st}}$  більш адекватно представлено кільцевий струм. Врахування компонентів ММП дозволяє моделювати утворення петель силових ліній у магнітосфері Землі. Модельні струми Біркеланда залежать від параметрів ММП (область I) та АЕ-індекса (область II), що дозволяє краще відтворити прояви магнітосферних суббур. Важливим параметром, який визначає орієнтацію модельної магнітосфери, є кут  $\Psi$ , що змінюється з часом. Внутрішнє поле Землі обчислюється на основі моделі IGRF для відпо-

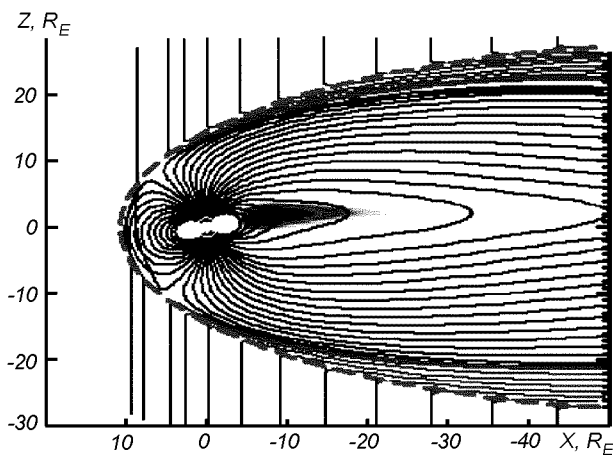


Рис. 5. Приклад миттєвої мапи магнітного поля моделі T96 у площині XZ при типових значеннях вхідних параметрів [37]



Рис. 6. Схема пакету GEOPACK (з опису програмного забезпечення)

відного року.

Модель T96 реалізована у вигляді пакету процедур на мові FORTRAN77 і може бути одержана з інформаційної мережі або безпосередньо від її автора. Пакет процедур GEOPACK у версії 1996 р. дозволяє визначити компоненти «головного» поля Землі, кут  $\Psi$ , елементи матриць повороту при переході між різними системами координат, що використовуються у геофізиці та космічній фізиці, та ін. Пакети містять зручні процедури трасування силових ліній магнітного поля через вибрану точку магнітосфери та відтворення положення магнітопаузи на вибраний момент часу (рис. 6).

У ряді робіт наведено результати детального тестування попередньої моделі T89 у широкому діапазоні параметрів. З'ясовано, що модель досить реалістично відтворює струмові системи у плазмовому шарі, особливо у внутрішньому хвості (кільцевий струм, струм поперек плазмового шару) [29]. Це пов'язано з тим, що в цій області проводилась переважна кількість вимірювань для отримання параметрів моделі. Проте T89 дає занижене значення для магнітного поля у долях хвоста. Відзначається також добре узгодження результатів моделювання спокійної магнітосфери з експериментальними даними. У роботі [41] проведено модельне проектування областей хвоста у авроральну область, причому результати порівнювалися з вимірюваннями на КА. Слід вказати на роботу [24], у якій проведено проектування границь всіх областей магнітосферного хвоста до  $X \leq -50R_E$ .

За попередніми результатами тестування, модель T96 краще, ніж T89, описує магнітосферу при збурених умовах.

При застосуванні моделі T96 для відтворення магнітосферного магнітного поля на певний момент вимірювань виникає проблема адекватного вибору вхідних параметрів  $P_{dyn}$ ,  $D_{st}$  і  $B_y$  та  $B_z$  ММП. Розглянемо це докладніше. Індекс  $D_{st}$ , як інші індекси геомагнітної та сонячної активності визначається шляхом обробки даних мережі магнітних обсерваторій і може бути отриманий з світових центрів даних за допомогою інформаційної мережі. Решта фізичних параметрів може бути відтворена за результатами прямих вимірювань КА, що знаходиться в сонячному вітрі, наприклад КА «Wind» та SOHO, які протягом останніх років здійснюють моніторинг міжпланетного середовища. Проте слід враховувати той факт, що вимірювання проводяться далеко від магнітопаузи і доцільно вводити часову затримку, необхідну для того, щоб вибрана область сонячного вітру досягла межі магнітосфери. Найпростіша оцінка такої затримки ґрунтується на величині гідродинамічної швидкості потоку плазми, тобто, знаючи координати КА, можна приблизно визначити у який момент часу збурення магнітного поля та густини плазми досягне магнітопаузи. Точне визначення часової затримки між процесами у ММП та магнітосфері викликає труднощі, які пропонується подолати, наприклад, вивчаючи кореляцію між послідовностями відповідних вимірів [10]. Ця проблема стикається з дослідженнями в області прогнозування «космічної погоди». У роботі [39] зазначається, що використання газодинамічної моделі GDCFM обтікання магнітосфери Землі сонячним вітром дозволяє коректно визначити часову затримку по відношенню до магнетосфари. Поки що



не розроблено зручної тривимірної МГД-моделі, яку можна було б безпосередньо застосовувати для аналізу експериментальних даних.

Існує велика кількість емпіричних моделей магнітосферного магнітного поля, які постійно удосконалюються. Наприклад, удосконалена модель Тофолетто-Хілла для відкритої магнітосфери [23], модель Остапенко для ближньої зони магнітосфери Землі  $4R_E \leq R \leq 10R_E$  [2]. Окремі програмні пакети для моделювання плазмових режимів магнітосфери (нейтрального шару, радіаційних поясів, магнітопаузи, віддаленого хвоста та ін.) у вказаних просторових межах за певних умов, можна отримати користуючись каталогом Geospace Environment Models (GEM) та Space Physics Models у NSSDC (Національний центр даних з космічної науки) у мережі «Інтернет».

## ВИСНОВКИ

Окреслимо можливі етапи визначення положення КА відносно окремих областей магнітосфери Землі. Використовуючи емпіричні моделі та домовленості про розташування різних областей магнітосфери можна орієнтовно прогнозувати їх положення в деякій системі координат, пов'язаній з Землею, в певний момент часу. У роботі наведено моделі магнітопаузи та ударної хвилі (1), (2), табл. 2—3; нейтрального шару (3)—(6); домовленості про положення граничних шарів та радіаційних поясів. У поєднанні з відомою траєкторією КА ця інформація дозволяє розв'язати задачу прогнозування. Показано приклад порівняння експериментальних даних з результатами прогнозу (рис. 4).

Застосування експериментальних критеріїв до даних КА дає змогу розв'язати задачу локалізації у вибраній інтервал вимірювань, тобто визначити реєстрацію приладами КА окремих магнітосферних режимів у певних просторових областях (див. табл. 1). У роботі наведено приклади застосування цих критеріїв на основі оригінальних даних, отриманих КА «Інтербол-1». У комплексний аналіз даних доцільно включати порівняння з типовими (незбуреними) просторовими профілями плазмових параметрів, характерних для даних режимів, кореляцію з процесами у ММП та індексами магнітосферної активності, і порівняння з результатами МГД- або емпіричного моделювання. Серед сучасних емпіричних моделей магнітосферного магнітного поля доцільно зазначити нову версію моделі Циганенка від 1996 р. та відповідний пакет моделювання «головного» магнітного поля Землі.

На рис. 7 умовно показані етапи розв'язання

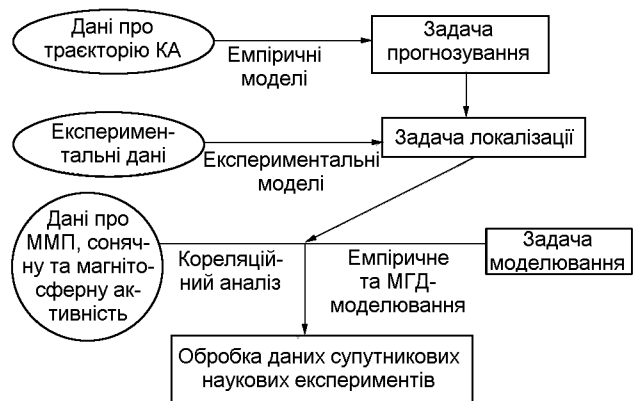


Рис. 7. Умовна блок-схема визначення положення КА відносно магнітосферних режимів у структурі обробки даних супутникових експериментів

задач та систему зв'язків між ними при визначенні положення областей магнітосфери за даними вимірювання КА.

Автори вдячні колегам з Інституту космічних досліджень РАН, особливо С. Клімову, С. Романову, А. Петруковичу, В. Грушину, Н. Ніколаєвій, за надання даних вимірювань магнітометра MIF-M, встановленого на КА Інтербол-хвостовий та численні обговорення, М. Циганенку (GSFC, NASA) за надані ним пакети програм T96 та GEOPACK, Т. Істману та С. Крайстону з Мерілендського університету (США) за надіслані ними матеріали досліджень «Geotail», які ще знаходилися у друку. Робота над оглядом підтримувалась державними контрактами 6-103/96 та 6-132/97 з Національним космічним агентством України.

1. Евдокимов В. П., Покрас В. М. Методы обработки данных в научных космических экспериментах. — М.: Наука, 1977.—176 с.
2. Остапенко А. А., Мальцев Ю. П., Мальков М. В. Модель магнитного поля во внутренней магнитосфере Земли // Геомагнетизм и аэрономия.—1996.—36, № 5.—35.
3. Akasofu S.-I. The magnetospheric currents: an introduction // Magnetospheric currents / Ed. by T. A. Potemra. — Washington, 1984.—P. 29.—(Geophys. Monogr. Ser., 28).
4. Angelopoulos V., Mitchell D. G., Willams D. J., et al. Growth and evolution of a plasmoid associated with a small, isolated substorm: IMP-8 and GEOTAIL measurements in the magnetotail // Geophys. Res. Lett.—1995.—22, N 22.—3011 p.
5. Bame S. J., Smith E. J., Ogilvie E., et al. Plasma regimes in the deep geomagnetic tail: ISEE 3 // Geophys. Res. Lett.—1983.—10, N 9.—912 p.
6. Behannon K. W. Geometry of the geomagnetic tail // J. Geophys. Res.—1970.—75.—743 p.
7. Christon S. P., Eastman T. E., Doke T., et al. Magnetospheric plasma regimes using Geotail measurements. 2. Statistics, spatial distribution, and geomagnetic dependence // J. Geophys. Res.—1997.

8. Christon S. P., Gloeckler G., Eastman T. E., et al. Average energetic ion flux variation associated with geomagnetic activity from EPIC/STICS on GEOTAIL // *J. Geophys. Res.*—1993.—98A, N 12.—21421 p.
9. Cowley S. W. H., Hynds R. J., Richardson J. G., et al. Energetic ion regimes in the deep geomagnetic tail: ISEE 3 // *Geophys. Res. Lett.*—1984.—11, N 3.—275 p.
10. Crooker N. U., Siscoe G. L., Russell C. T., Smith E. J. Factors controlling degree of correlation between ISEE 1 and ISEE 3 interplanetary magnetic field measurements // *J. Geophys. Res.*—1982.—87A, N 4.—P. 2224—2230.
11. Eastman T. E., Christon S. P., Doke T., et al. Magnetospheric plasma regimes using Geotail measurements, 1. Regime identification // *J. Geophys. Res.*—1997.
12. Eastman T. E., Roelof E. C., Criston S. P., et al. Energetic proton flux anisotropy in the Earth's magnetotail, 2: Geotail EPIC observations // *J. Geophys. Res.*—1997.
13. Elphinstone R. D., Hearn D., Murphree J. S., Cogger L. L. Mapping using the Tsyganenko long magnetospheric model and its relationship to Viking auroral images // *J. Geophys. Res.*—1991.—96A, N 4.—1467 p.
14. Fairfield D. H. Average and unusual location of the Earth's magnetopause and bow shock // *J. Geophys. Res.*—1971.—76, N 28.—P. 6700—6716.
15. Fairfield D. H. On the structure of the distant magnetotail: ISEE 3 // *J. Geophys. Res.*—1992.—97A, N 2.—1403 p.
16. Fairfield D. H. Solar wind control of the distant magnetotail: ISEE 3 // *J. Geophys. Res.*—1993.—98A, N 12.—21265 p.
17. Fairfield D. H., Acuna M. H., Zanetti L. J., Potemra T. A. The magnetic field of the equatorial magnetotail: AMPTE/CCE observations at  $R < 8.8$  Re // *J. Geophys. Res.*—1987.—92.—7432 p.
18. Farris M. H., Petrinec S. M., Russell C. T. The thickness of the magnetosheath: constraints on the polytropic index // *Geophys. Res. Lett.*—1991.—18, N 10.—1821 p.
19. Feldstein Y. I. and Elphinstone R. D. Aurorae and the large-scale structure of the magnetosphere // *J. Geomagn. and Geoelec.*—1992.—44.—1159 p.
20. Feldstein Ya. I., Galperin Yu. I. The auroral luminosity structure in the high-latitude upper atmosphere: its dynamics and relationship to the large-scale structure of the Earth's magnetosphere // *Rev. Geophys.*—1985.—23, N 3.—217 p.
21. Gosling J. T., McComas D. J., Thomsen M. F., et al. The warped neutral sheet in the near-Earth geomagnetic tail // *J. Geophys. Res.*—1986.—91.—7093 p.
22. Heikkila W. J. Magnetospheric topology of fields and currents // *Magnetospheric currents* / Ed. by T. A. Potemra. — Washington, 1984.—P. 208.—(Geophys. Monogr. Ser., 28).
23. Jordan S. E. Empirical models of the magnetospheric magnetic field // *Rev. Geophys.*—1994.—32, N 2.—P. 139—157.
24. Kaufmann R. L., Larson D. J., Beidl P., Lu C. Mapping and energization in the magnetotail. 1. Magnetospheric boundaries // *J. Geophys. Res.*—1993.—98, A6.—9307 p.
25. Lopez R. E. The position of the magnetotail neutral sheet in the near-Earth region // *Geophys. Res. Lett.*—1990.—17, N 10.—1617 p.
26. Moses and Owen. Plasma tail twisting and bending // Third International Conference on Substorms (ICS-3), Versailles, France, 12—17 May 1996.
27. Peredo M., Stern D. P. On the position of the near-Earth neutral sheet: a comparison of magnetic model predictions with empirical formulas // *J. Geophys. Res.*—1991.—96, A11.—19521 p.
28. Petrinec S. M., Russell C. T. An empirical model of the size and shape of the near-Earth magnetotail // *Geophys. Res. Lett.*—1993.—20, N 23.—2695 p.
29. Pulkkinen T. I., Baker D. N., Walker R. J., et al. Comparison of empirical magnetic field models and global MHD simulations: The near-tail currents // *Geophys. Res. Lett.*—1995.—22.—675 p.
30. Roelof E. C., Sibeck D. G. Magnetopause shape as a bivariate function of interplanetary magnetic field  $B_z$  and solar wind dynamic pressure // *J. Geophys. Res.*—1993.—98A, N 12.—P. 21421.
31. Sibeck D. G., Lopez R. E., Roelof E. C. Solar wind control of the magnetopause shape, location and motion // *J. Geophys. Res.*—1991.—96A, N 4.—P. 5489—5495.
32. Sibeck D. G., Siscoe G. L., Slavin J. A., et al. The distant magnetotail's response to a strong interplanetary magnetic field By: twisting, flattening and field line bending // *J. Geophys. Res.*—1985.—90A, N 5.—P. 4011.
33. Stasiewicz K. Polar cusp topology and position as a function of interplanetary magnetic field and magnetic activity: Comparison of a model with "Viking" and other observations // *J. Geophys. Res.*—1991.—96.—P. 15789—15800.
34. Stern D. P. The art of mapping the magnetosphere // *J. Geophys. Res.*—1994.—99.—17169 p.
35. Tsurutani B. T., Slavin J. A., Smith E. J., et al. Magnetic structure of the distant geotail from  $-60$  to  $-220$  Re: ISEE-3 // *Geophys. Res. Lett.*—1984.—11, N 1.—P. 1.
36. Tsyganenko N. A. Modeling the Earth's magnetospheric magnetic field confined within a realistic magnetopause // *J. Geophys. Res.*—1995.—100A, N 4.—P. 5599—5612.
37. Tsyganenko N. A., Stern D. P. A new-generation global magnetosphere field model, based on spacecraft magnetometer data // *ISTP Newsletter.*—1996.—6, N 1.—P. 21.
38. Yamamoto T., Shiokawa K., Kokubun S. Magnetic field structures of the magnetotail as observed by GEOTAIL // *Geophys. Res. Lett.*—1994.—21, N 25.—P. 2875.
39. Zhang X. X., Song P., Stahara S. S., et al. Large scale structures in the magnetosheath: exogenous or endogenous in origin // *Geophys. Res. Lett.*—1996.—23, N 1.—P. 105.
40. Zwickl R. D., Bakers D. N., Bame S. J., et al. Evolution of the Earth's distant magnetotail: ISEE 3 electron plasma results // *J. Geophys. Res.*—1984.—89A, N 12.—P. 11007.
41. Zvolakowska D., Popielawska B. Tail plasma domains and the auroral oval — results of mapping based on the Tsyganenko 1989 magnetosphere model // *J. Geomagn. and Geoelec.*—1992.—44.—P. 1145.

---

**METHODS FOR THE IDENTIFICATION OF MAGNETOSPHERE REGIONS BASED ON SPACECRAFT DATA: EXPERIMENTAL CRITERIA AND EMPIRICAL MODELLING**

**O. P. Verkhoglyadova and V. M. Ivchenko**

Problems arising in the analysis of spacecraft measurements made in the Earth's magnetosphere are discussed. Data processing should take into account the properties of plasma regions where the measurements were made. We give an overview of the most widely used experimental criteria, empirical models, and the features assumed to be characteristic of the magnetosphere regions. Preliminary scheme of the data analysis from the viewpoint of space physics is sketched. The study was made in the framework of the Interball-Tail data processing.