INTERNATIONAL STANDARD **ИСО**

РАБОЧИЙ ПРОЕКТ

МЕЖДУНАРОДНЫЙ СТАНДАРТ

Космическая среда (естественная и искусственная)

Модель магнитного поля магнитосферы Земли

РАБОЧИЙ
ПРОЕКТ

МОСКВА 2000

КОСМИЧЕСКАЯ СРЕДА (ЕСТЕСТВЕННАЯ И ИСКУССТВЕННАЯ) МОДЕЛЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

1 Область применения

Настоящий стандарт предназначен для вычисления вектора индукции магнитного поля в магнитосфере Земли. Стандарт устанавливает параметры крупномасштабных магнитосферных токовых систем в зависимости от условий в околоземном космическом пространстве и может быть использован при исследовании различных физических процессов в магнитосфере Земли, а также при расчетах, проектировании, испытаниях и оценке результатов эксплуатации космических аппаратов и другой техники, действующей в околоземном пространстве.

Расчеты в рамках предлагаемой в стандарте модели магнитного поля могут быть использованы при прогнозе радиационной обстановки в космическом пространстве, в том числе, во время интенсивных магнитных возмущений (магнитных бурь), при конструировании систем магнитной ориентации КА, при прогнозе воздействия геомагнитных возмущений на трансконтинентальные трубопроводы и линии электропередач.

Задачами стандартизации магнитного поля магнитосферы Земли являются:

- обеспечение однозначности представления геомагнитного поля внутриземных источников и магнитного поля магнитосферных токов;

- обеспечение сопоставимости результатов интерпретации и анализа космических экспериментов;

- сокращение трудоемкости расчетов магнитного поля магнитосферных токов в космическом пространстве на геоцентрических расстояниях от 1 до 6,6 радиусов Земли (R_E);

- обеспечение наиболее надежных расчетов всех элементов геомагнитного поля в околоземном космическом пространстве.

2 Определения, обозначения и сокращения

2.1. Вектор индукции магнитного поля $\vec{B}_M$ в магнитосфере Земли вычисляется по формуле

$$\vec{B}_M = \vec{B}_1 + \vec{B}_2, \quad nT \tag{1}$$

где $\vec{B}_1$ - вектор индукции геомагнитного поля внутриземных источников,

$\vec{B}_2$ - вектор индукции магнитного поля магнитосферных токов.

2.2. Магнитное поле внутриземных токов $\vec{B}_1$ представляется в виде ряда из сферических гармонических функций. Коэффициенты разложения (модель IGRF) подвержены незначительным изменениям, а их значения утверждаются Международной Ассоциацией Геомагнетизма и Аэрономии (МАГА) каждые 5 лет.

2.3. Магнитное поле магнитосферных токов $\vec{B}_2$ вычисляется по параболоидной модели магнитосферы.

3 Основные положения

3.1. Модель представляет вектор индукции магнитного поля магнитосферных токов как функцию от солнечно-магнитосферных координат.

3.2. Модель магнитного поля магнитосферных токов (далее - модель) описывает регулярную часть магнитного поля, ее зависимость от параметров межпланетной среды и отражает сжатие магнитосферы Земли на дневной стороне из-за взаимодействия с солнечным ветром, асимметрию день-ночь (поле на ночной стороне ослаблено), суточные и сезонные вариации поля в области от 1 до 6,6 R_E.

3.3. Модель учитывает угол наклона геомагнитного диполя к плоскости ортогональной линии Земля-Солнце, ψ, изменяющийся в интервале от -35° до +35°.

3.4. Вектор индукции магнитного поля магнитосферных токов вычисляется по формуле

$$\vec{B}_2 = \vec{B}_{sd}(\psi, R_1) + \vec{B}_t(\psi, R_1, R_2, \Phi_\infty) + \vec{B}_r(\psi, b_r) + \vec{B}_{sr}(\psi, R_1, b_r)\,. \quad (2)$$

Здесь $\vec{B}_{sd}$ - поле токов на магнитопаузе, экранирующих поле диполя; $\vec{B}_t$ - поле токовой системы магнитосферного хвоста (токи поперек хвоста и токи замыкания на магнитопаузе); $\vec{B}_r$ - поле кольцевого тока; $\vec{B}_{sr}$ - поле токов на магнитопаузе, экранирующих поле кольцевого тока.

3.5. Составляющие магнитного поля магнитосферных токов $\vec{B}_{sd}$, $\vec{B}_t$, $\vec{B}_r$, $\vec{B}_{sr}$ рассчитываются по параболоидной модели магнитосферы по отдельности, в виде рядов по функциям Бесселя. Каждая крупномасштабная магнитосферная токовая система имеет свою собственную систему экранирующих токов на магнитопаузе.

3.6. Коффициенты разложений составляющих магнитного поля магнитосферных токов $\vec{B}_{sd}$, $\vec{B}_t$, $\vec{B}_r$, $\vec{B}_{sr}$ определяются значениями параметров магнитосферных токовых систем: ψ - угол наклона диполя, R_1 - расстояние до подсолнечной точки на магнитопаузе, R_2 - расстояние до переднего края токового слоя магнитосферного хвоста, Φ_∞ - магнитный поток в долях хвоста, определяющий интенсивность тока в хвосте магнитосферы и b_r - интенсивность магнитного поля кольцевого тока в центре Земли.

3.7. Мгновенные значения параметров магнитосферных токовых систем $\psi, R_1, R_2, \Phi_\infty, b_r$ определяются через ограниченный набор эмпирических данных с помощью субмоделей (см. Приложение 1).

3.8. Динамика магнитосферы определяется как последовательность ее мгновенных состояний.

4 Расчет индукции магнитного поля магнитосферных токов

4.1. Магнитное поле токов на магнитопаузе, экранирующих поле геомагнитного диполя, $\vec{B}_{sd}$, рассчитывается из уравнения

$$\vec{B}_{sd} = -\nabla U_{sd},$$

где скалярный потенциал U_{sd} магнитного поля магнитосферных токов представлен в сферических переменных R, θ, φ (θ - полярный угол, измеряемый от оси X_{GSM}, φ - азимутальный угол, измеряемый против часовой стрелки от Z_{GSM}):

$$U_{sd} = -\frac{B_0 R_E^3}{R_1^2} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{R}{R_1}\right)^n \left[d_n^{\|} \sin\psi P_n(\cos\theta) + d_n^{\perp} \cos\psi P_n^1(\cos\theta)\right], \qquad (3)$$

$P_n(x) = (2^n n!)^{-1} \cdot \left(d^n \left(x^2-1\right)^n / dx^n\right)$, $P_n^1(x) = \sqrt{1-x^2} \cdot (dP_n/dx)$.

B_0 - величина магнитного поля геомагнитного диполя на геомагнитном экваторе. Первые шесть безразмерных коэффициентов $d_n^{\|}$ и $d_n^{\perp}$ представлены в Таблице 1.

Формулы для перехода к солнечно-магнитосферным координатам представлены в Приложении 2.

Таблица 1:

n	$d_n^{\perp}$	$d_n^{\parallel}$
1	0,6497	0,9403
2	0,2165	-0,4650
3	0,0434	0,1293
4	-0,0008	-0,0148
5	-0,0049	-0,0160
6	-0,0022	-0,0225

4.2. Магнитное поле токовой системы хвоста магнитосферы $\vec{B}_t$ рассчитывается в параболических координатах (α, β, φ) из уравнения:

$$\vec{B}_t = -\nabla U_t + \vec{B}_{t_{in}}$$

Где U_t определяется рядами:

$$U_t = b_t R_1 \begin{cases} \sum\limits_{k,n=1}^{\infty} (b_{nk} + c_{nk} K_n'(\lambda_{nk}\alpha_0)\lambda_{nk}) \cos\, n\varphi \; J_n(\lambda_{nk}\beta) I_n(\lambda_{nk}\alpha), & \alpha < \alpha_0 \\ \beta_t\, \alpha_0 \, ln\, \alpha \; sign(\frac{\pi}{2} - |\varphi|) + \\ \qquad \sum\limits_{k,n=1}^{\infty} c_{nk} \cos n\varphi I_n'(\lambda_{nk}\alpha_0)\lambda_{nk} J_n(\lambda_{nk}\beta) K_n(\lambda_{nk}\alpha), & \alpha \geq \alpha_0 \end{cases}$$

$$\text{здесь}: c_{nk} = b_{nk}\lambda_{nk} I_n(\lambda_{nk}\alpha_0), \quad b_{nk} = \frac{2\lambda_{nk} \int\limits_0^1 \int\limits_{-\pi}^{\pi} J_n(\lambda_{nk}\beta) f(\beta,\varphi) cos\, n\varphi \; d\varphi d\beta}{\pi(\lambda_{nk}^2 - n^2) J_n^2(\lambda_{nk}) I_n'(\lambda_{nk}\alpha_0)}$$

$$f(\beta,\varphi) = \begin{cases} \frac{\alpha_0}{\beta_t} \beta cos\,\varphi, & \alpha_0 \beta cos\,\varphi < \beta_t \\ sign(\frac{\pi}{2} - |\varphi|), & \alpha_0 \beta cos\,\varphi \geq \beta_t, \end{cases},$$

где λ_{nk} - нули уравнения J_n'=0; $\alpha_0 = \sqrt{1 - 2R_2/R_1}$ - параболическая координата внутреннего края токового слоя хвоста магнитосферы; $\beta_t = \dfrac{d}{R_1}$, d - полутолщина токового слоя; $b_t = \frac{2\Phi_\infty}{\pi R_1^2}\sqrt{R_1/(2R_2 + R_1)}$, - магнитное поле хвоста на внутренней границе токового слоя хвоста магнитосферы.

Магнитное поле внутри токового слоя, $\vec{B}_{t_{in}}$, рассчитывается из соотношений:

$$B_{t_{in}\alpha} = b_t \frac{\alpha_0}{\alpha} \frac{\beta}{\beta_t} \frac{cos\,\varphi}{\sqrt{\alpha^2+\beta^2}},\ B_{t_{in}\beta} = 0,\ B_{t_{in}\varphi} = 0.$$

Описание параболических координат и формулы перехода к солнечно-магнитосферным координатам приведены в Приложении 2.

4.3. Вектор магнитного поля кольцевого тока $\vec{B}_r$ вычисляется с помощью выражений:

$$\vec{B}_r = \frac{M_R}{M_E} \cdot \begin{cases} \left(\frac{R}{R_{rc}}\right)^5 \cdot \vec{B}_d + 2B_0 \frac{R_E^3}{R_2^3} \left(\frac{R_2^5}{R_{rc}^5} - 1\right) \vec{e}_z & \text{для} \quad 0 \le R \le R_2 \\ \\ \vec{B}_d & \text{для} \quad R \ge R_2 \end{cases} \tag{4}$$

где $R_{rc} = \sqrt{0,5(R^2+R_2^2)}$, $M_R = 0.5 b_r \cdot R_2^3/(4\sqrt{2}-1)$ - магнитный момент кольцевого тока, $M_E = B_0 \cdot R_E^3$ - магнитный момент геомагнитного диполя, $\vec{B}_d$ - магнитное поле геомагнитного диполя, $\vec{e}_z$ - единичный вектор направленный противоположно оси геомагнитного диполя.

Выражения для $\vec{B}_d$ и $\vec{e}_z$ в солнечно магнитосферных координатах приведены в Приложении 3.

4.4. Магнитное поле токов на магнитопаузе, экранирующих кольцевой ток $\vec{B}_{sr}$ рассчитывается из уравнения

$$\vec{B}_{sr} = -\nabla U_{sr},$$

где скалярный потенциал U_{sr} магнитного поля токов на магнитопаузе представлен в сферических переменных R, θ, φ (см. п.4.1.):

$$U_{sr} = -\frac{M_R}{R_1^2} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{R}{R_1}\right)^n \left[d_n^{\|} \sin\psi P_n(\cos\theta) + d_n^{\perp} \cos\psi P_n^1(\cos\theta)\right]. \tag{5}$$

Коэффициенты $d_n^{\|}$ и $d_n^{\perp}$ представлены в Таблице 1.

Приложение 1.

Субмодели: Расчет основных параметров магнитосферных токовых систем

В параболоидной модели магнитосферы значения параметров магнитосферных токовых систем вычисляются через субмодели. Субмодели представляют собой эмпирические соотношения или вспомогательные модели для связи параметров магнитосферных токовых систем с измеряемыми данными.

1. Угол наклона геомагнитного диполя, ψ, вычисляют по формуле

$$\sin\psi = -\sin\beta\cos\alpha_1 + \cos\beta\sin\alpha_1\cos\varphi_m \tag{6}$$

где α_1= 11,43° - угол между осью Земли и моментом геодиполя,
β - склонение Солнца ($\sin\beta = \sin\alpha_2\cos\varphi_{se}$),
α_2 = 23,5° - угол между осью Земли и нормалью к плоскости эклиптики,
φ_{se} = 0,9856263(172 - I) - угол между линией Солнце-Земля и проекцией земной оси на плоскость эклиптики,
I - номер дня в году,
$\varphi_m = UT \cdot 15° - 69,76°$ - угол между полуденно-полуночным и северным магнитным полярным меридианами,
UT - всемирное время в часах.

2. Расстояние от Земли до подсолнечной точки на магнитопаузе, R_1, рассчитывается из баланса между динамическим давлением солнечного ветра и магнитным давлением в магнитосфере:

$$2kP = {B_{0m}}^2/2\mu_0.$$

Здесь k - коэффициент, описывающий "степень упругости"взаимодействия частиц солнечного ветра с магнитопаузой ($k = 1$ для абсолютно упругого отражения и $k = 0,5$ для случая полностью неупругого взаимодействия),

P - динамическое давление солнечного ветра, B_{0m} - величина магнитосферного магнитного поля на магнитопаузе. Используя данные по скорости v и коцентрации n протонов солнечного ветра можно получить приближенное соотношение:

$$R_1 = 100/(nv^2)^{1/6} \tag{7}$$

(где R_1 измеряется в R_E; n в см$^{-3}$; а v в км/с).

3. Расстояние до переднего края токового слоя геомагнитного хвоста, R_2, вычисляется по формуле

$$R_2 = 1/\cos^2\varphi_k\,, \tag{8}$$

где R_2 выражено в R_E, а φ_k - полуночная широта приэкваториальной границы аврорального овала.

4. Магнитный поток в долях хвоста магнитосферы, Φ_∞, вычисляется по формуле

$$\Phi_\infty = \Phi_0 + \Phi_s\,, \tag{9}$$

где Φ_0 - магнитный поток в долях хвоста магнитосферы в спокойные периоды, а Φ_s - зависящий от времени магнитный поток в долях, связанный с усилением токовой системы хвоста магнитосферы во время суббуревых возмущений:

$$\Phi_0 = 3,7\cdot 10^8\text{Вб}$$

$$\Phi_s = -AL\frac{\pi R_1^2}{14}\sqrt{\frac{2R_2}{R_1}+1}\,, \tag{10}$$

где AL - авроральный индекс геомагнитной активности.

5. Интенсивность кольцевого тока характеризуется значением магнитного поля кольцевого тока в центре Земли, которая вычисляется по соотношению Десслера-Паркера-Скопке:

$$b_r = -\frac{2}{3} B_0 \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_d} \tag{11}$$

где ε_r полная энергия частиц кольцевого тока, а $\varepsilon_d = \frac{1}{3} B_0 M_E$ - энергия поля геомагнитного диполя.

Приложение 2.

Используемые системы координат

Сферические координаты R, θ, φ с полярной осью, направленной вдоль оси Солнце - Земля, определяются выражениями

$$\begin{aligned} x/R_1 &= R \cos \theta \\ y/R_1 &= R \sin \theta \sin \varphi \\ z/R_1 &= R \sin \theta \cos \varphi, \end{aligned} \tag{12}$$

где x, y, z - солнечно-магнитосферные (GSM) координаты.

Параболические координаты α, β, φ с полярной осью, направленной вдоль оси Солнце - Земля, определяются выражениями

$$\begin{aligned} 2x/R_1 &= \beta^2 - \alpha^2 + 1 \\ y/R_1 &= \alpha\beta \sin \varphi \\ z/R_1 &= \alpha\beta \cos \varphi, \end{aligned} \tag{13}$$

где x, y, z - солнечно-магнитосферные координаты. В параболической модели магнитосферы магнитопауза - поверхность $\beta = 1$.

Приложение 3.

Магнитное поле геомагнитного диполя

$\vec{B}_d$ и $\vec{e}_E$ в солнечно магнитосферных координатах описываются выражениями

$$
\begin{aligned}
&\vec{B}_d = -\nabla V_d \\
&V_d = (\tfrac{R_E}{R})^3 B_0 \cdot (z\cos\psi - x\sin\psi) \\
&\vec{e}_z = (-\sin\psi; \quad 0; \quad \cos\psi).
\end{aligned}
\tag{14}
$$