

*Малышев Данил Романович*

бакалавр, студент

*Научный руководитель*

*Двояшкин Нариман Камилович*

д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой

ГАОУ ВО «АГТУ «Высшая школа нефти»

г. Альметьевск, Республика Татарстан

DOI 10.21661/r-588739

## СОЛНЕЧНЫЙ ВЕТЕР И МАГНИТОСФЕРА ЗЕМЛИ ЧЕРЕЗ ПРИЗМУ УРАВНЕНИЙ МАКСВЕЛЛА

*Аннотация:* в работе показано, как четыре уравнения Максвелла описывают взаимодействие солнечного ветра с магнитосферой Земли: формирование магнитной ловушки, МГД-вмороженность поля, механизм полярных сияний и потерю атмосферы планетами без магнитного поля.

*Ключевые слова:* уравнения Максвелла, солнечный ветер, магнитосфера, МГД-индукция, полярное сияние, конус потерь, радиационные пояса.

### *1. Уравнения Максвелла и физика магнитосферы.*

Четыре уравнения Максвелла описывают все электромагнитные явления – от закона Ома до динамики космической плазмы. Ниже каждое уравнение рассматривается в приложении к магнитосфере Земли.

*M1 – Закон Гаусса для электрического поля.*

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \rho / \epsilon_0 \quad (1)$$

В квазинейтральной плазме солнечного ветра  $\rho \approx 0$ , поэтому  $\nabla \cdot \mathbf{E} \approx 0$  в глобальном масштабе. На масштабах дебаевской длины (~десятки метров) заряды разделяются, и локальные электрические поля, определяемые уравнением (1), удерживают плазму от расслоения [1, с. 248].

*M2 – Закон Гаусса для магнитного поля.*

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2)$$

Отсутствие магнитных монополей означает, что силовые линии всегда замкнуты. Дипольное поле Земли ( $B \sim 1/r^3$ ) образует замкнутые торообразные поверхности – магнитную ловушку для заряженных частиц, формирующую радиационные пояса Ван-Аллена.

*M3 – Закон Фарадея и МГД-вмороженность.*

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t \quad (3)$$

В идеально проводящей плазме условие  $\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B} = 0$  в сочетании с (3) даёт уравнение МГД-индукции:

$$\partial \mathbf{B} / \partial t = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (4)$$

Следствие – принцип вмороженности: магнитное поле перемещается вместе с плазмой. Солнечный ветер переносит поле Солнца к Земле в виде межпланетного магнитного поля (ММП). Деформация силовых линий солнечным ветром порождает электрическое поле (закон M3), которое создаёт токи Биркеланда ( $\sim 10^6$  А), питающие полярные сияния [2, с. 195].

*M4 – Закон Ампера-Максвелла.*

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j} + \mu_0 \epsilon_0 \partial \mathbf{E} / \partial t \quad (5)$$

Уравнение (5) связывает токи с пространственной структурой поля:  $\mathbf{j} = (1/\mu_0) \nabla \times \mathbf{B}$ . Три главных токовые системы магнитосферы:

– кольцевой ток ( $\sim 10^6$  А) на расстоянии 2–7  $R_z$ , ослабляющий поле у поверхности Земли во время магнитных бурь;

– токи Биркеланда (~сотни ГВт), соединяющие магнитосферу с ионосферой;

– хвостовой токовый слой, нестабильность которого вызывает магнитные суббури.

*2. Солнечный ветер и межпланетное магнитное поле.*

Солнечный ветер – сверхзвуковой поток плазмы из короны Солнца ( $T_{\text{кор}} \sim 1-2$  МК, скорость 400–800 км/с). Паркер показал, что при температуре короны давление газа разгоняет плазму до сверхзвука, и она достигает Земли за 3–4 суток [3, с. 312].

Вмороженность поля (уравнение (4)) обуславливает перенос ММП. Вращение Солнца ( $\sim 27$  суток) закручивает силовые линии в «спираль Паркера» с углом  $\sim 45^\circ$  у орбиты Земли. Южная компонента ММП ( $B_z < 0$ ) усиливает магнитное пересоединение на дневной магнитопаузе и увеличивает поступление энергии в магнитосферу [4].

### 3. Структура магнитосферы. Магнитопауза.

Магнитосфера – область доминирования земного поля. Её дневная граница (магнитопауза) определяется равновесием магнитного давления и динамического давления солнечного ветра. Из условия балансировки и дипольного закона  $B \sim 1/r^3$ :

$$r_{\text{мп}} \approx 10 R_3 \approx 64\,000 \text{ км} \quad (6)$$

Инертность магнитосферы велика: вдвое сжать её можно лишь при 64-кратном росте давления солнечного ветра. Ночная сторона вытянута в плазменный хвост длиной  $\sim 200 R_3$ .

### 4. Полярное сияние. Магнитная ловушка и конус потерь.

Заряженная частица в магнитном поле вращается с гирочастотой  $\Omega_c = |q|B/m$ . В неоднородном поле сохраняется магнитный момент:

$$\mu = m v_{\perp}^2 / (2B) = \text{const} \quad (7)$$

При движении частицы к полюсу  $B$  растёт,  $v_{\perp}$  растёт, продольная компонента  $v_{\parallel}$  убывает до нуля – зеркальное отражение. В атмосферу попадают лишь частицы с углом к полю меньше критического:

$$\sin \alpha_c = \sqrt{(B_0 / B_{\text{зерк}})} \quad (8)$$

Частицы в конусе потерь ( $\alpha < \alpha_c$ ) достигают высот 100–300 км и возбуждают атомы  $O_2$  и  $N_2$ : кислород на ~120 км даёт зелёный цвет, выше 200 км – красный, азот – синий и фиолетовый [2, с. 195].

### 5. Значение магнитосферы: урок Марса.

Марс утратил глобальное магнитное поле ~4 млрд лет назад вместе с остыванием жидкого ядра. Без магнитосферы солнечный ветер напрямую взаимодействует с верхней атмосферой; темп потерь:

$$\Phi_{\text{потерь}} \approx n_{\text{sw}} \cdot v_{\text{sw}} \cdot A_{\text{эфф}} \quad (9)$$

Миссия MAVEN (NASA, 2015) подтвердила: Марс теряет ~100 г/с атмосферы. За 4 млрд лет это привело к падению давления в ~150 раз. Для Земли магнитосфера сводит  $A_{\text{эфф}}$  к минимуму, защищая атмосферу и биосферу [4].

### 6. Заключение.

Уравнения Максвелла описывают всю наблюдаемую физику магнитосферы без дополнительных допущений (табл.).

Таблица

Уравнение	Роль в магнитосфере
M1: $\nabla \cdot E = \rho / \epsilon_0$	Квазинейтральность плазмы; локальные E-поля
M2: $\nabla \cdot B = 0$	Замкнутые силовые линии → радиационные пояса
M3: $\nabla \times E = -\partial B / \partial t$	Вмороженность ММП; токи Биркеланда → авроры
M4: $\nabla \times B = \mu_0 j + \dots$	Кольцевой ток, токовый хвост, магнитные бури

Фундаментальность уравнений Максвелла проявляется в том, что они одинаково точно описывают розетку в доме и щит, защищающий жизнь на Земле от солнечного ветра.

### Список литературы

1. Савельев И.В. Курс общей физики: учебник / И.В. Савельев. – 3-е изд. – В 3 т. Т. 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – М.: Наука, 1988. – 496 с.
2. Детлаф А.А. Курс физики: учеб. пособие для студентов вузов / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. – 5-е изд., испр. – М.: Академия, 2006. – 720 с.
3. Калашников С.Г. Электричество / С.Г. Калашников. – 6-е изд. – М.: Наука, 1985. – 576 с.
4. Пудовкин М.И. Солнечный ветер и его воздействие на Землю / М.И. Пудовкин // Соросовский образовательный журнал. – 1996. – №1. – С. 102–109.