

ДВИЖЕНИЕ НЕЙТРАЛЬНОГО ГАЗА В Е-СЛОЕ ИОНОСФЕРЫ И ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

Ю. С. ВАРДАНЯН

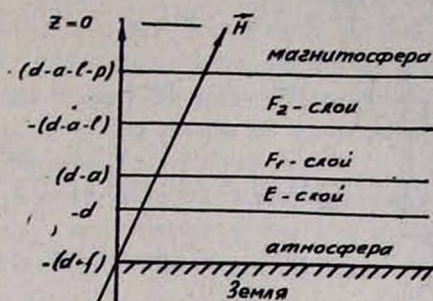
С учетом амбиполярной диффузии в верхних слоях ионосферы, электропроводности и горизонтальной составляющей магнитного поля Земли изучается электродинамическое состояние околоземного космического пространства, обусловленное движением нейтрального газа в динамо-области ионосферы.

Известно, что верхние слои Земли обладают хорошей проводимостью и что ее радиус R_z и высота ионосферного слоя намного больше толщины нейтральной атмосферы. Отсюда ясно, что электромагнитные процессы, протекающие в верхних слоях ионосферы и в недрах Земли, должны взаимодействовать через атмосферу и иметь взаимное отражение. Таким образом, необходимо решить самосогласованную задачу для всей длины силовой линии магнитного поля Земли, пронизывающей проводящую Землю и окружающее ее пространство.

С другой стороны, в области F ионосферы в отличие от области E атомные ионы являются основными, и поэтому ионно-молекулярные реакции определяют как фотохимию области, так и скорость уничтожения электронов. По мере увеличения высоты возрастает роль процесса диффузии, пока наконец в области выше максимума слоя F_2 этот процесс не начинает определять распределение ионов даже в дневное время. В области максимума слоя F_2 скорость диффузии ионов и электронов через нейтральный газ (амбиполярная диффузия) примерно равна скорости уничтожения ионов в фотохимических процессах, так что механизмы переноса влияют одновременно на концентрацию как ионов, так и электронов, т. е. не существует принципиального различия между фотохимией слоев F_1 и F_2 ионосферы. Основное различие между областями F_1 и F_2 состоит во вкладе процесса амбиполярной диффузии.

В настоящей работе рассматривается влияние «атмосферного динамо» на электродинамическое состояние околоземного космического пространства с учетом электропроводности и горизонтальной составляющей магнитного поля Земли, а также процессов переноса в верхних слоях ионосферы. Поскольку характерные размеры малы по сравнению с радиусом Земли, предлагается плоская многослойная модель проводящей Земли и околоземного космического пространства, симметричная относительно оси $z = 0$ (на рисунке представлено только южное полушарие). Слой бесконечно проводящей плазмы (магнитосфера) расположен между поверхностями $z = \pm (d - a - l - p)$ и соприкасается со слабо ионизированным газом в слое $d - a - l - p \leq |z| \leq d$, плоскости $z = \pm d$ представля-

ют собой границы между слабо ионизированным и нейтральным газом (атмосферой). E - и F_1 , F_1 и F_2 -ионосферные слои отделяются друг от друга соответственно плоскостями $z = \pm (d-a)$, $z = \pm (d-a-l)$, границы между атмосферой и Землей определяются плоскостями $z = \pm (d+f)$. Рассматривается магнитное поле вида $\mathbf{H} = \{\operatorname{sgn} z \cdot H_z, 0, H_z\}$ (см. рисунок), представляющее собой дипольное поле.



Пусть имеется мелкомасштабное геострофическое движение нейтрального газа в слое E со скоростью $\mathbf{W}$. Тогда благодаря явлению динамо возникнут электрические поля и токи, текущие по электропроводным слоям системы. Поскольку здесь, в отличие от использованной в [1, 2] схемы задачи, присутствует F_2 -слой (и атмосфера ограничена снизу, а также учитывается электропроводность Земли), выпишем линеаризованные уравнения стационарного движения ионов и электронов, где определяющим фактором является взаимодействие с нейтралами, только для слоя F_2 :

$$\begin{aligned} eN_0 \left\{ -\nabla \psi + \frac{1}{c} [\mathbf{v}_i, \mathbf{H}] \right\} &= \gamma_{in} \mathbf{v}_i + N_i m_i g + P_i, \\ -eN_0 \left\{ -\nabla \psi + \frac{1}{c} [\mathbf{v}_e, \mathbf{H}] \right\} &= \gamma_{en} \mathbf{v}_e + N_e m_e g + P_e, \\ \operatorname{div} N_0 \mathbf{v}_i &= q - r + D, \quad \operatorname{div} N_0 \mathbf{v}_e = q - r + D. \end{aligned}$$

Здесь N_0 — невозмущенная концентрация электронов и ионов, $\mathbf{v}_i$ и $\mathbf{v}_e$ — скорости ионов и электронов, ψ — потенциал электрического поля, $\mathbf{H}$ — напряженность магнитного поля Земли, γ_{in} (γ_{en}) — частота соударений ионов (электронов) с нейтралами, P_i , P_e и D — слагаемые, учитывающие амбиполярную диффузию.

В атмосфере из-за стационарности рассматриваемой задачи можно пренебречь не только токами проводимости, но и токами смещения. Следовательно, потенциал электрического поля будет удовлетворять уравнению Лапласа $\Delta \psi = 0$.

Подставив в уравнение непрерывности электрического тока

$$\operatorname{div} \mathbf{j} = \operatorname{div} eN_0 (\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_e) = 0$$

скорости электронов v_e и ионов v_i , найденные из соответствующих уравнений движения электронов и ионов, для потенциала ψ соответственно в E -, F_1 - и F_2 -слоях получим следующие уравнения:

$$\begin{aligned} \psi_{1xx}'' + \frac{m^2}{\lambda_l \lambda_e} \psi_{1yy}'' + m^2 \psi_{1zz}'' - \operatorname{sgn} z \cdot 2m \psi_{1zx}' - \\ - \left(\operatorname{sgn} z \frac{m^2}{H_n} - \frac{N_z'}{N} m^2 \right) \psi_{1z}' + m \left(\frac{1}{H_n} - \operatorname{sgn} z \frac{N_z'}{N} \right) \psi_{1x}' = \\ = \Lambda \left\{ \frac{H_z}{c} \left(\frac{m}{\lambda_l \lambda_e} \right) \left[\operatorname{rot}_z \mathbf{W} \cdot \mathbf{m} + W_y \left(\frac{1}{H_n} + \operatorname{sgn} z \frac{N_z'}{N} \right) \right] \right\} - \\ - g \frac{H_z}{c} \left[\left(\frac{1}{\gamma_{ln}} - \frac{1}{\gamma_{en}} \right) \left(\frac{1}{H_n} - \operatorname{sgn} z \frac{N_z'}{N} \right) \right] \frac{m^2}{\lambda_l + \lambda_e}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \psi_{2xx}'' + \frac{m^2}{\lambda_l \lambda_e} \psi_{2yy}'' + m^2 \psi_{2zz}'' - \operatorname{sgn} z \cdot 2m \psi_{2zx}' - \\ - \left(\operatorname{sgn} z \frac{m^2}{H_n} - \frac{N_z'}{N} m^2 \right) \psi_{2z}' + m \left(\frac{1}{H_n} - \operatorname{sgn} z \frac{N_z'}{N} \right) \psi_{2x}' = \\ = -g \frac{H_z}{c} \left[\left(\frac{1}{\gamma_{ln}} - \frac{1}{\gamma_{en}} \right) \left(\frac{1}{H_n} - \operatorname{sgn} z \frac{N_z'}{N} \right) \right] \frac{m^2}{\lambda_l + \lambda_e}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \psi_{3xx}'' + \frac{m^2}{\lambda_l \lambda_e} \psi_{3yy}'' + m^2 \psi_{3zz}'' - \operatorname{sgn} z \cdot 2m \psi_{3zx}' - \\ - \left(\operatorname{sgn} z \frac{m^2}{H_n} - \frac{N_z'}{N} m^2 \right) \psi_{3z}' + m \left(\frac{1}{H_n} - \operatorname{sgn} z \frac{N_z'}{N} \right) \psi_{3x}' = \\ = -g \frac{H_z}{c} \left[\left(\frac{1}{\gamma_{ln}} - \frac{1}{\gamma_{en}} \right) \left(\frac{1}{H_n} - \operatorname{sgn} z \frac{N_z'}{N} \right) \right] \frac{m^2}{\lambda_l + \lambda_e} + P, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\lambda_{l,e} = \frac{eH_z}{m_{l,e}} \cdot \frac{1}{c} \cdot \frac{1}{\gamma_{l,e,n}}$ являются разными в (1)–(3) из-за неоднородности ионосферы, $\gamma_{l,e,n} = \gamma_{l,e,0} \exp \left[-\frac{1}{H_n} (d - |z|) \right]$ — частота со-

ударений электронов (ионов) с нейтралами, $H_n = kT_n/m_n g$ — высота однородной атмосферы, скорость $\mathbf{W}$ нейтрального газа в E -слое удовлетворяет уравнению $\operatorname{div} \mathbf{W} = 0$, $m = H_z/H_x$, P — член, ответственный за амбиполярную диффузию в F_2 -слое [3], $N_n = N_0 \exp \left[-\frac{1}{H_n} (d - |z|) \right]$ —

плотность нейтральных молекул. При ковращении, когда движение нейтрального газа в торцах ячейки (соответствующее движению нейтралов в E -слое северного и южного полушарий) одинаково, $\Lambda = 1$, а при антивращении, когда соответствующее движение противоположно, $\Lambda = -\operatorname{sgn} z$.

Решение уравнений (1)–(3) ищем для

$$\mathbf{W} = \left\{ \frac{W_0}{k_1} \cdot \sin k_1 x \cdot \sin k_2 y, \frac{W_0}{k_2} \cdot \cos k_1 x \cdot \cos k_2 y \right\},$$

т. е. фурье-разложений W_x и W_y по координатам x и y . Землю считаем идеально проводящей. Значит на границе между атмосферой и Землей $\psi = 0$. Остальные граничные условия те же, что и в [1, 2], поэтому нет необходимости особо на них останавливаться.

Разность скоростей ионов и электронов в ионосфере создает электрический ток $j = lN_0(v_i - v_e)$, причем v_i, v_e выражаются через потенциал ψ , скорость нейтралов W и амбиполярную диффузию. При антивращении по силовым линиям магнитного поля течет электрический ток. В этом можно убедиться, беря ротор от обеих частей уравнения Эйлера для плазмы $-\nabla p + 1/c [jH] = 0$ и используя условие $\text{div } j = 0$. Аналогичным образом можно показать, что электрический ток через магнитосферу при ковращении отсутствует.

Известно, что ионосферные токи, определяемые физическими параметрами ионосферы, в свою очередь влияют на величину последних. В рассматриваемой модели из уравнений

$$\text{div } N v_i = -\alpha (n_i + n_e), \quad -\Delta \psi_1 = 4\pi e (n_i - n_e) \text{ в } E\text{-слое,}$$

$$\text{div } N v_i = q - r, \quad -\Delta \psi_2 = 4\pi e (n_i - n_e) \text{ в } F_1\text{-слое,}$$

$$\text{div } N v_i = q - r + P_d, \quad -\Delta \psi_3 = 4\pi e (n_i - n_e) \text{ в } F_2\text{-слое}$$

можно непосредственно найти возмущение плотности заряженных частиц n_i и n_e во всем ионосферном слое. Здесь $q = q_0 \exp \left[-\frac{1}{H_n} (d - |z|) \right] -$

чепменовское распределение скорости ионизации, α — коэффициент рекомбинации положительных ионов с электронами в E -слое, $r = \alpha_r N N_n$, α_r — коэффициент прилипания электронов к нейтралам, P_d — диффузионный член в F_2 -слое.

Такая постановка задачи имеет большое значение для изучения физических явлений, происходящих в Земле и ее оболочке. Отметим, что магнитные поля, создаваемые ионосферными токами (вариации основного земного магнитного поля), используются для целей разведки и изучения внутреннего строения Земли [4], а ионосферные неоднородности играют большую роль в долгосрочном прогнозировании космической радиосвязи [5].

При реальных параметрах ионосферы численные расчеты показали, что учет электропроводности Земли и процессов амбиполярной диффузии в верхних слоях ионосферы вносит ощутимую поправку в значения вычисленных ранее в [1] электрических полей и продольных токов, перестраивающих ионосферу. Оказалось, что при постоянной скорости нейтралов W имеется обратная экспоненциальная зависимость значений электрических полей, токов и возмущения плотности заряженных частиц от высоты атмосферы. При этом амбиполярная диффузия вносит отрицательный вклад в значения электрических полей и возмущения плотности n_i, n_e и положительный вклад в значения электрических токов.

Автор выражает благодарность Б. А. Тверскому за обсуждение результатов.

Институт радиофизики и электроники
АН АрмССР

Поступила 14. XI. 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. С. Варданын. Геомагнетизм и аэрономия, 17, 1012 (1977).
2. Л. М. Алексеева, Ю. С. Варданын, Б. А. Тверской. Геомагнетизм и аэрономия, 9, 437 (1969).
3. V. C. A. Ferraro. Terr. Magn. Atmos. Elect., 50, 215 (1945).
4. Е. В. Трейн. Сб. «Космическая геофизика», Изд. Мир, М., 1976.
5. Геомагнитные пульсации. Под ред. Б. А. Тверского, Изд. Наука, М., 1973.

ԻՈՆՈՍՓԵՐԻ Ե-ՇԵՐՏԻ ՁԵՋՈՔ ԳԱՋԻ ՇԱՐՔՈՒՄԸ
ԵՎ ՄԵՐՁԵՐԿՐՅԱ ՏԻԵՋԵՐԱԿԱՆ ՏԱՐԱԾՈՒԹՅԱՆ
ԷԼԵԿՏՐԱԴԻՆԱՄԻԿԱԿԱՆ ՎԻՃԱԿԸ

ՅԱՆ Ս. ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ

Հաշվի առնելով իոնոսֆերայի վերին շերտերում տեղի ունեցող ամբիպոլյար դիֆուզիան, Երկրի էլեկտրահաղորդականությունը և նրա մագնիսական դաշտի հորիզոնական բաղադրիչը, ուսումնասիրվում է մերձերկրյա տիեզերական տարածության էլեկտրադինամիկական վիճակը պայմանավորված իոնոսֆերայի դինամո-տիրույթի շեղոք դադի շարժումով: Հաշվված են էլեկտրամագնիսական դաշտերը, հոսանքները, Հաշվված են նաև լիցքավորված մասնիկների խտությունների գրգռումները:

THE MOTION OF NEUTRAL GAS IN THE E-LAYER OF IONOSPHERE AND THE ELECTRODYNAMIC STATE OF CIRCUMTERRANEAN SPACE

Yu. S. VARDANYAN

Taking into account the ambipolar diffusion in the upper layers of the ionosphere as well as the conductivity and the horizontal component of the terrestrial magnetic field, the electrodynamic state of circumterrestrial space due to the motion of neutral gas in the dynamo-domain of the ionosphere was studied.