УДК 550.388.2

# СООТНОШЕНИЯ ГРАНИЧНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН МЕЖДУ СЛОЯМИ В ПОЛНОЙ МОДЕЛИ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА И ЧИСЛЕННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ИХ АНАЛИТИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В КАЖДОМ СЛОЕ

### Ю.С. ВАРДАНЯН

#### Институт радиофизики и электроники НАН Армении, Аштарак

(Поступила в редакцию 5 июля 2007 г.)

В работе показано, что аналитическое решение задачи "атмосферного динамо" во всем объеме и граничные условия между слоями выбранной модели околоземного космического пространства однозначным образом определяют электродинамическое состояние всей системы. Приведены численные значения решений задачи для каждого из слоев.

Ионосфера – это область неоднородной слабоионизованной плазмы, которая содержит свободные электроны в таком количестве, что воздействует на распространение радиоволн. Современная наука подразделяет ионосферу от поверхности Земли на слои D, E, F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub>, имеющие небольшие (по сравнению с главным) максимумы в распределении электронной концетрации и различные толщины, в которых происходят специфические для каждой области физико-химические и динамические процессы [1-4].

В работе [5] для околоземного пространства от поверхности Земли до внешней магнитосферы изучена задача "атмосферного динамо", связанного с границы мелкомасштабным движением нейтрального газа в ионосфере. Причем околоземное пространство от поверхности Земли представлено в виде слоев нейтральной атмосферы, которая снизу замкнута бесконечно проводящей Землей, Е и F1, F2 областей ионосферы, и идеально проводящей магнитосферы. Слой D отсутствует из-за низкой концетрации в нем заряженных частиц и малости его толщины по сравнению с характерными размерами задачи (~200 км). Как известно, Земля и ее газовая оболочка – вплоть до внешней границы магнитосферы – пронизаны магнитным полем Земли и обладают хорошей проводимостью. Поэтому в физическом отношении они составляют одно целое и проявляют себя как единая электродинамическая система. Отсюда следует, что любые горизонтальные (перпендикулярные магнитному полю Земли) движения в ионосфере путем механизма динамо приведут к возникновению электрических полей и токов, текущих по электропроводным слоям системы.

В ионосфере вследствие различной освещенности температура на дневной стороне

несколько выше, чем на ночной, и поэтому существует градиент давления, перпендикулярный силе тяжести. При наличии вращения Земли это приводит к появлению стационарных потоков, параллельных земной поверхности. К такому роду движения относятся образования типа бенаровских ячеек. Сила трения между движением газа, состоящим из нейтральных частиц и ионами и электронами в магнитном поле Земли вызывает электрические токи.

Экспериментально были обнаружены восходящие электрические токи с характерным пространственным размером ~200–300 км [6]. Естественно связать их появление с действием динамо-механизма в ячейках соответствующих размеров. Через плазму магнитосферы осуществляется электродинамическая связь между ионосферой южного и северного полушарий, поэтому следует рассматривать самосогласованную задачу для всей длины силовой линии магнитного поля Земли, пронизывающей ионосферу и магнитосферу. Малость характерного размера изучаемого явления (~200–300 км) по сравнению с радиусом Земли позволяет применить плоскую геометрическую модель.

Теоретический анализ задачи [5] на ионосферных и магнитосферных высотах проведен методом квази- и магнитогидродинамического приближения, рассмотрением систем уравнений переноса количества движения для трех компонент – ионов, электронов и нейтральных частиц, а также ионизационно-рекомбинационных и диффузионных процессов. Произвольные мелкомасштабные движения нейтрального газа в ионосфере в сопряженных точках магнитной силовой линии северного и южного полушарий разлагаются на антисимметричные и симметричные. Иными словами, ячейка, проходящая через электропроводную часть системы, рассматривается как жидкий многослойный униполярный индуктор, состоящий из слоев Е, F1, F2 и магнитосферы, когда его наружные слои вращаются в противоположном и одинаковом направлении. В такой постановке задачи аналитические решения электродинамических величин работы [5] приведены ниже в соотношениях граничных значений между слоями системы.

В настоящей работе приводятся граничные условия для соответствующих физических величин между слоями рассмотренной уже задачи [5] и дается их физическое обоснование. Показано, что соотношения граничных значений электродинамических величин составляют полную систему линейных алгебраических уравнений относительно произвольных постоянных, заключенных в их аналитических решениях, полученных в каждом из слоев указанной задачи.

Известно, что магнитная гидродинамика выходит за пределы обычной гидродинамики, вследствие "действия на расстоянии", имеющего место в электромагнитных явлениях. Следовательно, нельзя просто ограничиться рассмотрением области проводящей жидкости; нужно учитывать также условия в остальной части пространства. Отсюда понятно, что в магнитной гидродинамике возникает трудность в связи с внешними и граничными условиями для интересующих нас переменных величин и их производных на границах областей, занятых жидкостью, на поверхностях раздела между областями и вне проводящей области. Каждое уравнение порождает соответствующее условие, поэтому практически невозможно дать полный путеводитель по тому, какие граничные условия требуются для каждой мыслимой задачи магнитной гидродинамики. При решении каждой задачи исследо-

ватель должен самостоятельно установить – сколько требуется граничных условий и какими должны быть необходимые и достаточные граничные условия. Обычно хорошо продуманная и реалистично поставленная задача достигает цели. Придерживаясь таких правил, в работах [5-7] установлены граничные условия для физических величин, которые однозначным образом определяют поставленную задачу. Однако мы не будем для их обоснования еще раз вдаваться в подробности физических рассуждений. Здесь будут приведены только граничные условия для соответствующих физических величин между слоями для рисунка, представленного в работе [5], в полной модели околоземного космического пространства. Причем граничные условия будут представлены как для случая антивращения, так и ковращения [6].

Случай антивращения. Когда движение нейтрального газа в сопряженных точках северного и южного полушарий противоположно, для потенциала электрического поля  $\Psi$  имеем следующие граничные условия:  $f_1^{F_2} = 0$  при  $z = \pm (d - a - l - p)$  на границе слоя  $F_2$  и магнитосферы,  $f_1^{F_2} = f_1^{F_1}$  при  $z = \pm (d - a - l)$  на границе слоев  $F_2$  и  $F_1$ ,  $f_1^{F_1} = f_1^E$  при  $z = \pm (d - a)$  на границе слоев  $F_1$  и E,  $f_1^{F_1} = f_1^a$  при  $Z = \pm d$  на границе слоя E и нейтральной атмосферы и  $f_1^a = 0$  при  $z = \pm (d + f)$  на границе нейтральной атмосферы и в приближении с бесконечной проводимостью Земли. Для электрического тока j имеем следующие граничные условия:  $j_z^{F_2} = j_z^M$  при  $z = \pm (d - a - l - p)$  на границе слоя  $F_2$  и магнитосферы, причем ток в магнитосфере направлен по магнитному полю Земли, постоянен и равен значению  $j_z^{F_2}$  на границе [6],  $j_z^{F_2} = j_z^F$  при  $z = \pm (d - a - l)$  на границе слоя  $F_2$  и  $F_1$ ,  $j_z^F = j_z^F$  при  $z = \pm (d - a)$  на границе слое  $F_2$  и  $F_1$ ,  $j_z^F = j_z^F$  при  $z = \pm (d - a)$  на границе слое  $F_2$  и  $F_1$  на границе  $j_z^{F_2}$  на границе слое  $F_1$  и E,  $j_z^F = j_z^F$  при  $z = \pm (d - a - l)$  на границе слоя  $F_2$  и  $F_1$ ,  $f_z^F = j_z^F$  при  $z = \pm (d - a)$  на границе слое  $F_2$  и  $F_1$ ,  $f_z^F = j_z^F$  при  $z = \pm (d - a)$  на границе слое  $F_2$  и  $F_1$ ,  $F_2$  на границе  $F_1$  и  $F_2$   $F_2$   $F_1$  при  $z = \pm (d - a - l)$  на границе слое  $F_2$  и  $F_1$ ,  $F_2$   $F_2$   $F_2$   $F_1$  при  $z = \pm (d - a)$  на границе слое  $F_1$  и  $F_1$   $F_2$   $F_2$   $F_1$  при  $z = \pm (d - a)$  на границе слое  $F_1$  и  $F_1$   $F_2$   $F_2$   $F_3$  при  $z = \pm (d - a - l)$  на границе слое  $F_2$  и  $F_1$   $F_2$   $F_2$   $F_2$   $F_2$   $F_3$  при  $z = \pm (d - a)$  на границе слое  $F_1$  и  $F_2$   $F_3$  при  $z = \pm (d - a)$  на границе слое  $F_1$  и  $F_2$   $F_3$   $F_$ 

**Случай ковращения**. Когда движение нейтрального газа в сопряженных точках северного и южного полушарий одинаково, граничные условия те же что и для случая антивращения, за исключением условия  $j_z^{F_2} = 0$  при  $z = \pm (d - a - l - p)$  на границе слоя F<sub>2</sub> и магнитосферы, т.е. ток через магнитосферу отсутствует.

Подставляя в эти соотношения граничные значения физических величин, аналитические решения для электрических полей и токов, найденные в каждом из слоев рассматриваемой задачи [5], для случая антивращения получим следующую систему уравнений:

$$f_{1}^{F_{2}}\Big|_{z=\pm(d-a-l-p)} = \alpha_{1}\Big[A\overline{\beta}_{1}(t) + \overline{B}\beta_{2}(t) + C_{1}\overline{\beta}_{3}(t) + C_{2}\overline{\beta}_{4}(t)\Big] + \alpha_{6}\Big|_{z=\pm(d-a-l-p)} = 0,$$

$$f_{1a.o.}^{F_{2}}\Big|_{z=\pm(d-a-l-p)} = \alpha_{1}\Big[A\overline{\beta}_{1}(t) + B\overline{\beta}_{2}(t) + C_{1}\overline{\beta}_{3}(t) + C_{2}\overline{\beta}_{4}(t)\Big]\Big|_{z=\pm(d-a-l-p)} = 0,$$

$$(1)$$

$$j_{za.o.}^{F_{2}}\Big|_{z=\pm(d-a-l-p)} = eN_{0}\Big[A\overline{G}_{1}(t) + B\overline{G}_{2}(t) + C_{1}\overline{G}_{3}(t) + C_{2}\overline{G}_{4}(t)\Big]\Big|_{z=\pm(d-a-l-p)} = 0$$

на границе слоя F<sup>2</sup> и магнитосферы – областей слабоионизованного газа, где в фотохимических процессах преобладают ионно-молекулярные реакции, а в распределении заряженных частиц играет роль также амбиполярная диффузия, и бесконечно проводящей плазмы;

$$\begin{split} f_{1}^{F_{2}} \Big|_{z=\pm(d-a-l)} &= \alpha_{1} \Big[ A\overline{\beta}_{1}(t) + B\overline{\beta}_{2}(t) + C_{1}\overline{\beta}_{3}(t) + C_{2}\overline{\beta}_{4}(t) \Big] + \alpha_{6} \Big|_{z=\pm(d-a-l)} = f_{1}^{F_{1}} \Big|_{z=\pm(d-a-l)} = \\ &= \alpha_{1} \Big[ C_{3}\beta_{5}(t) + C_{4}\beta_{6}(t) + C_{5}\beta_{7}(t) \Big] + \alpha_{6} \Big|_{z=\pm(d-a-l)} , \\ f_{1a.o.}^{F_{2}} \Big|_{z=\pm(d-a-l)} &= \alpha_{1} \Big[ A\overline{\beta}_{1}(t) + B\overline{\beta}_{2}(t) + C_{1}\overline{\beta}_{3}(t) + C_{2}\overline{\beta}_{4}(t) \Big] + \alpha_{6} \Big|_{z=\pm(d-a-l)} = 0, \quad (2) \\ j_{z}^{F_{2}} \Big|_{z=\pm(d-a-l)} &= eN_{0} \Big[ A\overline{G}_{1}(t) + B\overline{G}_{2}(t) + C_{1}\overline{G}_{3}(t) + C_{2}\overline{G}_{4}(t) \Big] \Big|_{z=\pm(d-a-l)} = j_{z}^{F_{1}} \Big|_{z=\pm(d-a-l)} = \\ &= eN_{0} \Big[ C_{3}G_{5}(t) + C_{4}G_{6}(t) + C_{5}G_{7}(t) \Big] \Big|_{z=\pm(d-a-l)} , \\ j_{za.o.}^{F_{2}} \Big|_{z=\pm(d-a-l)} &= eN_{0} \Big[ A\overline{G}_{1}(t) + B\overline{G}_{2}(t) + C_{1}\overline{G}_{3}(t) + C_{2}\overline{G}_{4}(t) \Big] \Big|_{z=\pm(d-a-l)} = 0 \end{split}$$

на границе слоев F<sub>1</sub> и F<sub>2</sub> – областей слабоионизованного газа, где фотохимические процессы образования и уничтожения ионов и электронов почти совпадают (за исключением амбиполярной диффузии, которая в слое F<sub>1</sub> отсутствует);

$$\begin{aligned} f_{1}^{\mathrm{F}_{1}} \Big|_{z=\pm(d-a)} &= \alpha_{1} \Big[ C_{3}\beta_{5}(t) + C_{4}\beta_{6}(t) + C_{5}\beta_{7}(t) \Big] + \alpha_{6} \Big|_{z=\pm(d-a)} = f_{1}^{\mathrm{E}} \Big|_{z=\pm(d-a)} = \\ &= \alpha_{10}\beta_{8}(t) \Big[ C_{6}\beta_{9}(t) + C_{7}\beta_{10}(t) + C_{8}\beta_{11}(t) \Big] + \alpha_{6} \Big|_{z=\pm(d-a)}, \end{aligned}$$
(3)  
$$j_{z}^{\mathrm{F}_{1}} \Big|_{z=\pm(d-a)} &= eN_{0} \Big[ C_{3}G_{5}(t) + C_{4}G_{6}(t) + C_{5}G_{7}(t) \Big] \Big|_{z=\pm(d-a)} = j_{z}^{\mathrm{E}} \Big|_{z=\pm(d-a)} = \\ &= eN_{0} \Big[ C_{6}G_{8}(t) + C_{7}G_{9}(t) + C_{8}G_{10}(t) \Big] \Big|_{z=\pm(d-a)} \end{aligned}$$

на границе слоев Е и F<sub>1</sub> – областей слабоионизованного газа, где в фотохимии заряженных частиц преобладают, соответственно, процессы диссоциативной рекомбинации и ионномолекулярные реакции;

$$f_{1}^{E}\Big|_{z=\pm d} = \alpha_{10}\beta_{8}(t)\Big[C_{6}\beta_{9}(t) + C_{7}\beta_{10}(t) + C_{8}\beta_{11}(t)\Big] + \alpha_{6}\Big|_{z=\pm d} = f_{1}^{a}\Big|_{z=\pm d} = 2C_{9}\mathrm{sh}k\left(d+f-|z|\right)\Big|_{z=\pm d},$$

$$j_{z}^{E}\Big|_{z=\pm d} = eN_{0}\Big[C_{6}G_{8}(t) + C_{7}G_{9}(t) + C_{8}G_{10}(t)\Big]_{z=\pm d} = j_{z}^{a}\Big|_{z=\pm d} = 0$$
(4)

на границе слоев нейтральной атмосферы и слоя Е – областей, где, соответственно, отсутствуют заряженные частицы и превалируют процессы диссоциативной рекомбинации;

$$f_1^a \Big|_{z=\pm(d+f)} = 2C_9 \operatorname{sh}k \left( d+f-|z| \right) \Big|_{z=\pm(d+f)} = 0, \qquad j_z^a \Big|_{z=\pm(d+f)} = 0$$
(5)

на границе Земли и нейтральной атмосферы – областей с бесконечной электропроводностью и нейтральным газом. Для случая ковращения первое уравнение системы (1),  $f_1^{\rm F_2} \Big|_{z=\pm(d-a-l-p)} = 0$ , заменяется уравнением

$$j_{1}^{F_{2}}\Big|_{z=\pm(d-a-l-p)} = eN_{0}\Big[AG_{1}(t) + BG_{2}(t) + C_{1}G_{3}(t) + C_{2}G_{4}(t)\Big]\Big|_{z=\pm(d-a-l-p)} = 0.$$

Здесь  $f_1^{F_2}$ ,  $j_z^{F_2}$  и  $f_{1a,d.}^{F_2}$ ,  $j_{za,d.}^{F_2}$  – выделенные части электрических полей и токов в слое F<sub>2</sub>, которые ответственны, соответственно, за фотохимию, движение ветров и амбиполярную диффузию в ионосфере, *A*, *B*, *C*<sub>1</sub>, ...,9 – произвольные постоянные,  $\beta_{1,...,11}(t)$  и *G*<sub>1,...,10</sub>(*t*) – известные функции от  $t = e^{-2(d+f-|z|)/Hn}$ , заключенные в аналитических решениях задачи [5]. (1,...,9 – постоянные, определяющие учет процессов амбиполярной диффузии, состоящие из регулярных физических параметров структуры околоземного космического пространства и имеющие следующий вид:

$$\begin{aligned} \alpha_{1} &= \frac{H}{c} \frac{1}{k_{0}^{2}} \frac{\lambda_{i0} \lambda_{eo}}{(\lambda_{i0}^{2} - \lambda_{e0}^{2})}, \quad \alpha_{2} = -\frac{7}{4} \frac{1}{Hn} \frac{1}{\gamma_{i0}} \frac{1}{\gamma_{e0}} g\left(\omega_{e} m_{i} + \omega_{i} m_{e}\right) + \left(-\frac{7}{4} \frac{1}{Hn} \frac{1}{\gamma_{i0}} \frac{1}{\gamma_{eo}}\right) \frac{5}{Hn} \times \\ &\times (kT_{i} \lambda_{e0} \gamma_{e0} + kT_{e} \lambda_{i0} \gamma_{i0}), \\ \alpha_{3} &= a_{r} Nn^{(0)} \left(\lambda_{i0} + \lambda_{eo}\right) + k_{0}^{2} \left(\frac{kT_{i} \lambda_{e0}}{\gamma_{i0} \lambda_{i0}^{2}}\right) + k_{0}^{2} \left(\frac{kT_{e} \lambda_{i0}}{\gamma_{e0} \lambda_{e0}^{2}}\right), \\ \alpha_{4} &= \frac{1}{Hn} \frac{1}{\gamma_{i0}} \frac{1}{\gamma_{e0}} g\left(\omega_{e} m_{i} + \omega_{i} m_{e}\right) + \frac{1}{Hn} \frac{1}{\gamma_{i0}} \frac{1}{\gamma_{e0}} \frac{8}{Hn} \left(kT_{i} \lambda_{e0} \gamma_{e0} + kT_{e} \lambda_{i0} \gamma_{i0}\right), \\ \alpha_{5} &= -\frac{4}{Hn^{2}} \frac{1}{\gamma_{i0}} \frac{1}{\gamma_{e0}} \left(kT_{i} \lambda_{e0} \gamma_{e0} + kT_{e} \lambda_{i0} \gamma_{i0}\right), \\ \alpha_{6} &= \frac{H}{c} \frac{W_{0}}{k_{1} k_{2}}, \quad \alpha_{7} &= -\frac{7}{4} \frac{1}{Hn} \frac{1}{\gamma_{i0}} \frac{1}{\gamma_{e0}} \frac{1}{m_{e}} g\left(\omega_{e} + \omega_{i}\right), \\ \alpha_{8} &= a_{r} Nn^{(o)} \left(\lambda_{i0} + \lambda_{e0}\right), \quad \alpha_{9} &= \frac{1}{Hn} \frac{1}{\gamma_{i0}} \frac{1}{\gamma_{e0}} \frac{1}{m_{e}} g\left(\omega_{e} + \omega_{i}\right), \end{aligned}$$

причем  $\alpha_1, \dots, q$  входят в  $\beta_1, \dots, q_1(t)$  и  $G_1, \dots, q_0(t)$  линейным образом. Обозначения физических параметров те же, что и в работе [5]. Отсюда следует, что  $\beta_1, \dots, q_1(t)$  и  $G_1, \dots, q_0(t)$  с учетом (6) можно представить в виде суммы слагаемых  $\beta_1, \dots, q_1(t) = \overline{\beta_1}, \dots, q_1(t) + \overline{\overline{\beta_1}}, \dots, q_1(t)$  и  $G_1, \dots, q_0(t)$  $= \overline{G}_1, \dots, q_0(t) + \overline{\overline{G_1}}, \dots, q_0(t)$ , причем каждая пара  $\overline{\beta_i}(t), \overline{\overline{\beta_i}}(t)$  и  $\overline{G_i}(t), \overline{\overline{G_i}}(t)$  содержит соответственно члены, характеризующие фотохимию, движение ветров и амбиполярную диффузию в ионосфере. Именно такой смысл имеют  $\overline{\beta_i}(t), \overline{\overline{\beta_i}}(t)$  и  $\overline{G_i}(t), \overline{\overline{G_i}}(t)$  в системе уравнений (1), (2).

Как видно, уравнения (1), (2), (3), (4) составляют полную систему линейных алгебраических уравнений относительно постоянных *A*, *B*, *C*1,...,9, заключенных в аналитических решениях задачи [5]. Это означает, что поставленная задача [5] в приближении бесконечно проводящей Земли, во взаимосвязи разных физических процессов в каждом из слоев, определяется однозначным образом. Здесь надо отметить, что эти уравнения составлены с учетом условия обращения в нуль потенциала электрических полей и нормальной составляющей токов, обусловленных амбиполярной диффузией, на границах слоя F2 ионосферы с магнитосферой и слоем F1, а также линейности задачи – путем разделения потенциала электрических полей и токов на члены, ответственные за фотохимию, движение нейтрального газа и амбиполярную диффузию.

В настоящей работе приводятся численные значения электромагнитных величин,

рассчитанных в работе [5], при следующих реальных параметрах: расстояние по силовой линии магнитного поля Земли между сопряженными точками на широтах 65°  $d = 4(10^4 \text{ км};$  высота нейтральной атмосферы от поверхности Земли f = 100 км; толщина Е-слоя a = 40 км; толщина F<sub>1</sub>-слоя l = 60 км (занимает область от 140 до 200 км). На высотах от 200 км до условно принятой нами высоты 400 км простирается F<sub>2</sub>-слой, с параметром толщины p = 200 км. Ионная и нейтральная компоненты в слоях Е и F, соответственно, состоят из  $O_2^+$ ,  $O_2^-$  и  $O^+$ , O.

Значения температуры нейтралов *T*<sup>*n*</sup> в Е- и F-слоях приняты, соответственно, равными 300 1000 Κ K, температура ионов/электронов и а в  $F_2$ -слое  $T_{i,e} = 1000$  К. Высота однородной атмосферы  $H_n = 8 \times 10^5$  см в Е-слое и *H*<sup>*n*</sup> = 8х10<sup>6</sup> см в F-слое. Коэффициент рекомбинации положительных ионов и электронов в Eслое  $\alpha = 10^{-7}$  см<sup>3</sup>/сек; коэффициент уничтожения заряженных частиц в F<sub>1</sub>- и F<sub>2</sub>-слоях принят равным  $a_r = 10^{-13} \text{ см}^3/\text{сек}$ , чепменовское распределение скорости ионизации  $q_0 = 10^2 \text{ см}^{-3}/\text{сек}$ . Концентрация нейтральных и заряженных частиц на начальных условных высотах принята рав-

ной  $N_{0n} = 10^{12}$  ат/см<sup>3</sup> и  $N_0 = 10^5$  ат/см<sup>3</sup> в Е-слое и  $N_{0n} = 4x10^{10}$  ат/см<sup>3</sup> и  $N_0 = 4x10^5$  ат/см<sup>3</sup> в Е-слое. Частоты столкновений ионов и электронов с нейтральными частицами на тех же высотах имеет значения  $y_{io} = 10^4$  сек<sup>-1</sup>,  $y_{eo} = 3x10^4$  сек<sup>-1</sup> в Е-слое и  $y_{io} = 2x10^3$  сек<sup>-1</sup>,  $y_{eo} = 10^4$  сек<sup>-1</sup> в Е-слое и  $y_{io} = 2x10^3$  сек<sup>-1</sup>,  $y_{eo} = 10^4$  сек<sup>-1</sup> в Е-слое и  $y_{io} = 2x10^3$  сек<sup>-1</sup>,  $y_{eo} = 10^4$  сек<sup>-1</sup> в Е-слое. Амплитуда скорости ветра  $w_0/k_{1,2} = 200$  м/сек, размер ячейки  $2\pi/k_{1,2} = 200$  км.

Далее, аппроксимируя экспериментальную кривую для концентраций заряженных частиц (взятую из [4]) формулой  $N_{0i,e} = N_0 \exp(z/H_m)$ , можно найти для антивращения следующие значения вариации электрических и магнитных полей, а также возникающих возмущений плотности заряженных частиц и токов в различных слоях предложенной модели околоземного космического пространства при напряженности магнитного поля на поверхности Земли H = 1/2 Гс:

$$\begin{split} E_x^{\rm E} &\approx 5 \times 10^{-7} \, {\rm B/cm}, \qquad E_y^{\rm E} &\approx 3.4 \times 10^{-7} \, {\rm B/cm}, \qquad E_z^{\rm E} &\approx 2 \times 10^{-8} \, {\rm B/cm}, \\ E_x^{\rm F_1} &\approx 10^{-8} \, {\rm B/cm}, \qquad E_y^{\rm F_1} &\approx 3 \times 10^{-8} \, {\rm B/cm}, \qquad E_z^{\rm F_1} &\approx 4 \times 10^{-9} \, {\rm B/cm}, \\ E_x^{\rm F_2} &\approx 7 \times 10^{-8} \, {\rm B/cm}, \qquad E_y^{\rm F_2} &\approx 10^{-8} \, {\rm B/cm}, \qquad E_z^{\rm F_2} &\approx 3 \times 10^{-9} \, {\rm B/cm}, \\ j_x^{\rm E} &\approx 5 \times 10^{-10} \, {\rm A/cm}^2, \qquad j_y^{\rm E} &\approx 4 \times 10^{-10} \, {\rm A/cm}^2, \qquad j_z^{\rm E} &\approx 5 \times 10^{-11} \, {\rm A/cm}^2, \\ j_x^{\rm F_1} &\approx 3 \times 10^{-9} \, {\rm A/cm}^2, \qquad j_y^{\rm F_1} &\approx 5 \times 10^{-10} \, {\rm A/cm}^2, \qquad j_z^{\rm F_1} &\approx 10^{-10} \, {\rm A/cm}^2, \\ j_x^{\rm F_2} &\approx 10^{-10} \, {\rm A/cm}^2, \qquad j_y^{\rm F_2} &\approx 4 \times 10^{-10} \, {\rm A/cm}^2, \qquad j_z^{\rm F_2} &\approx 10^{-9} \, {\rm A/cm}^2, \end{split}$$

а также

$$n_{e,i}^{F_1} \approx 4 \times 10^2 \,\mathrm{cm}^{-3}, \quad n_{e,i}^{F_2} \approx 3 \times 10^2 \,\mathrm{cm}^{-3}; \quad h_{x,y}^{E} \approx 40\gamma, \quad h_z^{E} \approx 20\gamma, \quad h_{x,y}^{F_{1,2}} \approx 2\gamma, \quad h_z^{F_2} \approx 0.8\gamma.$$

Напомним, что индексы Е и F1,2 относятся к соответствующим слоям ионосферы.

Отсюда видно, что в высоких широтах, где магнитные силовые линии вертикальны, а ионосферные слои тесно связаны, горизонтальные поля  $E_x$  и  $E_y$  почти не зависят от координаты *z*. С другой стороны, горизонтальные токи *j*<sub>x</sub> и *j*<sub>y</sub> уменьшаются с высотой в

соответствии с уменьшением проводимостей Педерсена и Холла,  $\sigma_P$  и  $\sigma_H$ , обусловленным изменением с высотой частоты столкновений электронов и ионов с нейтралами. Поэтому горизонтальные токи в ионосфере протекают главным образом в ее нижних слоях, что подтверждается численными расчетами. Кроме того, имеется и значительный вертикальный ток  $j_z$ , который все же меньше токов  $j_x$  и  $j_y$ . Действительно, большая проводимость вдоль вертикальных линий магнитного поля Земли приводит почти к выравниванию электрических потенциалов в сопряженных точках северного и южного полушарий, в результате чего уменьшается напряженность поля  $E_z$  по сравнению с  $E_x$  и  $E_y$ . Оказалось также, что эти токи могут существенно изменить распределение концентрации электронов в верхних слоях ионосферы. Это подтверждается и численными расчетами, которые качаственно согласуются с ожидаемыми результатами.

При тех же параметрах в условиях ковращения возникают поля, токи и возмущения концентраций, намного меньшие приведенных выше значений для антивращения.

Полученные результаты могут быть использованы при интерпретации данных радарных и спутниковых измерений электрических и магнитных полей и токов в магнитосфере и ионосфере Земли, а возмущения плотности – при долгосрочном прогнозировании космической радиосвязи. Учет мелкомасштабных вихревых движений нейтрального газа, по-видимому, может объяснить нерегулярное и асимметричное поведение токовых  $S_{d}$ -систем, наблюдаемое в северном и южном полушариях, а также возмущения плотности заряженных частиц в верхних слоях ионосферы. Однако следует заметить, что расчеты проведены нами на основе усредненных по высоте параметров ионосферы, взятых из работы [4]. Поэтому при количественной оценке результатов следует ограничиваться лишь порядком их величин.

Понятно, что условие идеальной проводимости Земли на границе с нейтральной атмосферой значительно упрощает задачу. Однако при этом исследуемая электродинамическая система оказывается экранированной от внешних воздействий, что не позволяет определить магнитные поля вне этой системы, что иногда бывает необходимо.

### ЛИТЕРАТУРА

1. З.Бауэр. Физика планетных ионосфер. М., Мир, 1976.

- 2. Космическая геофизика (под ред. Б.Е.Брюнелли, Я.И.Фельдштейна, В.П.Шабанского). М., Мир, 1976.
- 3. С.И.Акасофу, С.Чепмен. Солнечно-земная физика. М., Мир, 1974.
- 4. Околоземное космическое пространство (под ред. В.П.Шабанского). М., Мир, 1965.
- 5. Ю.С.Варданян. Изв. НАН Армении, Физика, **27**, 163 (1992).
- 6. Л.М.Алексеева, Ю.С.Варданян, Б.А.Тверской. Геомагнетизм и аэрономия АН СССР, 9, 437 (1969).
- 7. Ю.С.Варданян. Геомагнетизм и аэрономия АН СССР, 17, 1012 (1977).
- 8. Ю.С.Варданян. Изв. НАН Армении, Физика, **30**, 261 (1995).

# ሆኮՋԵՐԿՐՅԱ ՏԻԵԶԵՐԱԿԱՆ ՏԱՐԱԾՈՒԹՅԱՆ ԼՐԻՎ ՄՈԴԵԼԻ ՇԵՐՏԵՐԻ ՄԻՋԵՎ ԱՌԿԱ ՖԻԶԻԿԱԿԱՆ ՄԵԾՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԵԶՐԱՅԻՆ ԱՐԺԵՔՆԵՐԻ ՀԱՐԱԲԵՐԱԿՅՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ ԵՎ ԴՐԱՆՑ ԱՆԱԼԻՏԻԿ ԼՈՒԾՄԱՆ ԹՎԱՅԻՆ ԱՐԺԵՔՆԵՐԸ ՅՈՒՐԱՔԱՆՉՅՈՒՐ ՇԵՐՏԻ ՀԱՄԱՐ

## Յ.Ս. ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ

Ցույց է տրված, որ "մթնոլորտային դինամոյի" ինդրի անալիտիկ լուծումն ամբողջ ծավալում և մերձերկրյա տիեզերական տարածության համար ընտրված մոդելի շերտերի միջև ընկած եզրային պայմանները միարժեքորեն որոշում են ամբողջ համակարգի էլեկտրադինամիկ վիձակը։ Շերտերից յուրաքանչյուրի համար բերված են խնդրի լուծման թվային արժեքները։

# RELATIONS BETWEEN THE VALUES OF INTER-LAYER PHYSICAL QUANTITIES IN A COMPLETE MODEL OF EXTRA-TERRESTRIAL COSMIC SPACE AND NUMERICAL VALUES OF THEIR ANALYTICAL SOLUTIONS IN EACH LAYER

#### Yu. S. VARDANYAN

It is shown that in our model of layered Earth-surrounding cosmic space, the analytical solutions of the "atmospheric dynamo" problem in the entire volume and the boundary conditions between the layers uniquely determine the electrodynamic state of the system. Numerical solutions for each layer are given.