

УДК 550.388.2

МЕЛКОМАСШТАБНОЕ ДИНАМО ПОЛНОЙ МОДЕЛИ ГАЗОВОЙ
ОБОЛОЧКИ ЗЕМЛИ (ВПЛОТЬ ДО ВНЕШНЕЙ ГРАНИЦЫ
МАГНИТОСФЕРЫ) И ЕЕ ВНУТРЕННЕГО СЛОИСТОГО СТРОЕНИЯ

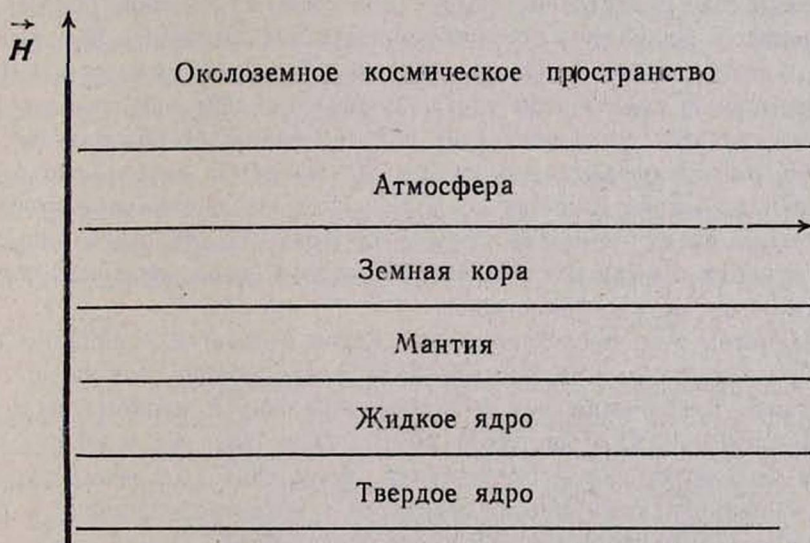
Ю. С. ВАРДАНЯН

Институт радиофизики и электроники НАН Армении

(Поступила в редакцию 5 мая 1995 г.)

В работе рассмотрено мелкомасштабное динамо полной модели околоземного космического пространства (вплоть до внешней границы магнитосферы) и внутреннего слоистого строения Земли. В рамках предложенной модели рассчитаны электрические поля, токи и создаваемые ими магнитные поля внутри Земли.

В работе изучается индуцирование электромагнитных полей и токов в Земле, вызванное атмосферными ветрами в ионосфере. Причем Земля рассматривается как кусочно-однородный слоистый проводник, отделенный от многослойной ионосферы и магнитосферы сравнительно тонким слоем нейтральной атмосферы (см. рисунок). Поскольку электромагнитные процессы, протекающие в верхних слоях ионосферы и недрах Земли должны взаимодействовать через атмосферу, то необходимо решать самосогласованную задачу для всей длины силовой линии магнитного поля Земли, пронизывающей проводящую Землю и окружающее ее пространство [1].



Ясно, что генерируемые в ионосфере электромагнитные поля будут просачиваться через атмосферу в проводящие слои Земли и вызывать в ее глубинах электрические токи и магнитные поля.

В приближении бесконечно проводящей Земли в [2] была решена стационарная задача (что вполне оправдано для рассматриваемой задачи) для электромагнитных полей и токов, вызванных ионосферными ветрами путем механизма динамо. Однако предложенная модель, где Земля в электродинамическом отношении рассматривается как однородная, бесконечно проводящая среда, не позволяла сколько-нибудь, даже теоретически, делать рассуждения относительно просачивания электрических полей во внутренние области Земли и возникновения токов и магнитных полей (так как на границе нейтральная атмосфера—сверхпроводящая среда возникают поверхностные заряды и препятствуют проникновению электрических полей из атмосферы в Землю, т. е. электростатический потенциал на границе атмосферы—Земля обращается в постоянную величину—условно, в нуль).

Здесь для предложенной в [2] модели околоземного космического пространства и Земли, состоящей из плоских слоёв коры, мантии, жидкого и твердого ядра, изучается эффект механизма динамо, связанного с мелкомасштабным (по сравнению с радиусом Земли) движением нейтрального газа в ионосфере. Известно, что электрические поля, возбуждаемые ионосферными ветрами, размеры которых больше высоты однородной атмосферы, передаются в соседние области почти без затухания (детальный анализ этого вопроса дан в [3]). Следовательно, распространяясь через атмосферу, они будут просачиваться в земную толщу, обладающую определенной электропроводностью, и создавать там электрические токи и магнитные поля. Естественно, чтобы рассчитать такую самосогласованную задачу, необходимо решить систему физических уравнений, описывающих рассматриваемые процессы, для каждой области околоземного космического пространства и внутреннего строения Земли и удовлетворить всем граничным условиям найденных физических величин. В статье [2] для газовой оболочки Земли, вплоть до внешней границы магнитосферы, данная задача решена и получены в общем виде аналитические выражения электродинамических величин в каждой из областей ионосферы, магнитосферы и атмосферы. То же самое необходимо сделать для земных слоёв и привести полученные выражения в соответствие с теми же величинами для газовой оболочки Земли путем сшивки их на границах между слоями полной модели, охватывающей Землю и окружающее ее пространство.

Отметим, что представленная модель относится к высоким широтам и, следовательно магнитное поле Земли можно считать перпендикулярным к границам раздела плоских слоев, а мелкомасштабное (в смысле работы [4]) движение нейтрального газа в ионосфере, вследствие чего возникают электрические поля, считается неодинаковым в разных сопряженных точках северного и южного полушарий и разлагается на сумму коврашения и антиврашения [1].

В настоящей работе будет приведена лишь только унифицированная запись систем уравнений движения и непрерывности заряженных частиц работы [2] для каждой из областей околоземного космичес-

кого пространства. В случае необходимости за решениями и методами их получения можно обратиться к [2]. Здесь же мы приводить их не будем из-за экономии пространства, а будем говорить лишь только о путях и методах определения полей и токов во внутренних слоях Земли.

Итак, линеаризованные относительно возмущений физических величин уравнения движения и непрерывности для ионов и электронов во всем ионосферном слое имеют вид:

$$\frac{-\Delta p_i}{N_{oi}} + e \left\{ -\nabla \psi + \frac{1}{c} [\mathbf{v}_i \mathbf{H}] \right\} = \gamma_{in}(\mathbf{v}_i - \mathbf{W}) + \frac{n_i}{2N_{oi}} (m_i + m_e) \mathbf{g}, \quad (1)$$

$$\frac{-\Delta p_e}{N_{eo}} - e \left\{ -\Delta \psi + \frac{1}{c} [\mathbf{v}_e \mathbf{H}] \right\} = \gamma_{en}(\mathbf{v}_e - \mathbf{W}) + \frac{n_e}{2N_{oe}} (m_i + m_e) \mathbf{g},$$

$$\operatorname{div} N_{oi} \mathbf{v}_i = -\alpha N_{oi} (n_i + n_e), \quad (2)$$

$$\operatorname{div} N_{oe} \mathbf{v}_e = -\alpha N_{oe} (n_i + n_e),$$

$$\operatorname{div} N_{oi} \mathbf{v}_i = -\alpha_r N_n n_e, \quad (3)$$

$$\operatorname{div} N_{oe} \mathbf{v}_e = -\alpha_r N_n n_e.$$

В этих уравнениях $\mathbf{v}_i$, $\mathbf{v}_e$ и n_i , n_e —соответственно скорости и возмущения равновесных концентраций N_{oi} , N_{oe} ионов и электронов, возмущения их давлений $p_i = n_i k T_i$, $p_e = n_e k T_e$, поскольку процессы считаются изотермическими, k —постоянная Больцмана, ψ —потенциал электрического поля, $\mathbf{g}$ —ускорение силы тяжести, γ_{in} , γ_{en} —частоты соударений ионов и электронов с частицами нейтрального газа, $\mathbf{W}$ —скорость нейтральных частиц, J —функция ионообразования Чепмена, α —коэффициент рекомбинации положительных ионов с электронами, β —формальный (т.к. в F области реакция прилипания отсутствует) коэффициент прилипания электронов к нейтральным атомам, линейно зависящий от концентрации нейтральных частиц, т.е. $\beta = \alpha_r N_n$. Поясним, что система уравнений (1), (2), (3) с определенными значениями параметров относится соответственно к (E, F_1, F_2) , E , (F_1, F_2) слоям ионосферы. К этим уравнениям во всех случаях добавляется еще уравнение Пуассона $-\Delta \psi = 4\pi e(n_i - n_e)$ и описывающие электродинамику нейтральной атмосферы и бесконечно проводящей плазмы (магнитосферы) соответственно уравнения Лапласа $-\Delta \psi = 0$ и Эйлера $\Delta p = \frac{1}{c} [\mathbf{j} \mathbf{H}]$.

Однако решение уравнения Лапласа для электрического потенциала ψ в нейтральной атмосфере, полученное в виде гармоник Фурье-разложения при замкнутой нижней границе, т.е. когда электрический потенциал примыкает к бесконечно проводящей Земле, обращается в нуль. Рассматриваемая модель, как уже было сказано, допускает проникновение поля во внутрь Земли. Следовательно, потенциал должен быть найден из системы уравнений, полностью определяющей произвольные постоянные найденных электродинамических

величин. Как уже было сказано, движение нейтрального газа в сопряженных точках разлагается на ко- и антивращение. И из предыдущих исследований известно, что оба эти случая движения накладывают определенные условия на симметрию решений задачи в южном и северном полушариях [4]. Отсюда и следуют граничные условия между ионосферой и магнитосферой для потенциала электрического поля и возможность возникновения электрических токов в ионосфере и их протекания по магнитным силовым линиям Земли через магнитосферу между двумя полушариями. Симметрия решений основных уравнений газовой оболочки Земли будет иметь свои последствия и при рассмотрении электрических явлений в Земле, поскольку в рамках данной задачи они обусловлены возмущениями в ионосфере. Математически это будет видно после сшивки электрического потенциала на границе нейтральная атмосфера—кора Земли при обоих случаях движения (ко- и антивращение).

Возбуждаемые ионосферными ветрами электрические токи в земных слоях могут быть написаны в общем виде

$$\mathbf{j} = \sigma_{\parallel} \mathbf{E}_{\parallel} + \sigma_p \mathbf{E}_{\perp} + \sigma_H \frac{[\mathbf{H} \mathbf{E}]}{H},$$

где $\mathbf{E}_{\parallel}$, $\mathbf{E}_{\perp}$ — компоненты электрического поля, направленные вдоль и перпендикулярно магнитному полю, H — магнитное поле Земли, $\sigma_{\parallel}$, σ_p , σ_H называются соответственно продольной проводимостью и проводимостями Педерсена и Холла. Это уравнение с соответствующими значениями проводимостей относится ко всем слоям Земли (в том числе и к твердой части ядра с определенными оговорками), кроме внешнего жидкого слоя ядра, который принимается бесконечно электропроводящим и описывается уравнением Эйлера $\Delta p = \frac{1}{c} [\mathbf{j} \mathbf{H}]$.

Заметим, что в избранной прямоугольной системе координат ось z в настоящей работе, как и в [2], направлена по магнитному полю Земли. Тогда электрические токи, разложенные по координатным осям, и тензор проводимости будут иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} j_x &= \sigma_p E_x - \sigma_H E_y, \quad j_y = \sigma_H E_x + \sigma_p E_y, \\ j_z &= \sigma_{\parallel} E_z, \quad \bar{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_p & -\sigma_H & 0 \\ \sigma_H & \sigma_p & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\parallel} \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (4)$$

Так как рассматривается стационарный случай, то замкнутость токов выражается соотношением $\text{div} \mathbf{j} = 0$. Предположив, что проводимости меняются только по оси z (то же самое, что по радиусу Земли), и учитывая соотношение $\mathbf{E} = -\nabla \psi$, будем иметь

$$\text{div} \mathbf{j} = \sigma_p \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\sigma_{\parallel} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) = 0, \quad (5)$$

т.е. отсутствует член, содержащий проводимость Холла. Далее, потребовав непрерывности нормальной составляющей тока j_z и потенциала ψ на границах между слоями, установим граничные условия и для определения ψ из уравнения (5).

По предположению проводимости $\sigma_{||}$, σ_p , σ_H меняются только по оси z , поэтому решение уравнения (5) можно искать в виде фурье-разложения $\psi = f(z)e^{i(k_1x + k_2y)}$. Подставляя это выражение в (5), будем иметь

$$\sigma_{||} f''_{zz}(z) + \sigma'_{||z} f'_z(z) - \sigma_p k^2 f(z) = 0,$$

где $k^2 = k_1^2 + k_2^2$.

Заметим, что здесь k_1 , k_2 по замыслу задачи те же, что и в работе [2] для газовой оболочки Земли. Далее, производя замену переменной $\xi = \int \sqrt{\sigma_p / \sigma_{||}} dz$ в (5) и аппроксимируя выражение $\sigma_m = \sqrt{\sigma_p \sigma_{||}}$ экспоненциальной функцией $\sigma_m = \sigma_0 e^{m\xi}$, определим функцию f и тем самым и потенциал электрического поля ψ в виде

$$\psi = e^{-\frac{m}{2}\xi} (A_1 e^{\xi} + A_2 e^{-\xi}) \cdot \sin k_1 x \cdot \cos k_2 y. \quad (6)$$

Здесь $t = \frac{1}{2} \sqrt{m^2 + 4k^2}$; A_1 , A_2 — произвольные постоянные (вообще говоря, разные для каждого слоя), которые определяются из граничных условий.

После этого из уравнения Пуассона $-\Delta\psi = 4\pi\rho$ легко определить и плотность зарядов поляризации $\rho = -\frac{1}{4\pi} (\psi''_{zz} - k^2\psi)$.

Индукцируемые в сопряженных точках уходящей вглубь Земли в северном и южном полушариях магнитной силовой линии в коре электрические поля, распространяясь по внутренним слоям, будут создавать электрические токи и магнитные поля. Причем электрические токи между сопряженными точками в земной коре будут замыкаться по магнитным силовым линиям Земли через внутреннее ядро и горизонтальный слой коры (поскольку проводимость вдоль магнитных силовых линий $\sigma_{||}$ существенно выше проводимостей в перпендикулярных направлениях σ_p и σ_H , имеющих наибольшее значение в верхних слоях Земли).

Компоненты электрического тока с учетом (4) и (6) имеют вид

$$\begin{aligned} j_x &= [e^{-\frac{m}{2}\xi} (A_1 e^{\xi} + A_2 e^{-\xi})] (-\sigma_p k_1 \cdot \cos k_1 x \cdot \cos k_2 y - \sigma_H k_2 \sin k_1 x \cdot \sin k_2 y), \\ j_y &= [e^{-\frac{m}{2}\xi} (A_1 e^{\xi} + A_2 e^{-\xi})] (-\sigma_H k_1 \cdot \cos k_1 x \cdot \cos k_2 y + \sigma_p k_2 \sin k_1 x \cdot \sin k_2 y), \\ j_z &= -\sigma_{||} \sqrt{\sigma_p / \sigma_{||}} \left[\left(t - \frac{m}{2} \right) A_1 e^{(t-\frac{m}{2})\xi} - \left(t + \frac{m}{2} \right) A_2 e^{-(t+\frac{m}{2})\xi} \right] \cdot \sin k_1 x \cdot \cos k_2 y. \end{aligned} \quad (7)$$

Как уже было сказано выше, жидкая часть ядра описывается уравнением Эйлера $\Delta p = \frac{1}{c} [jH]$. Беря ротор от обеих частей этого

равенства, будем иметь $H \frac{\partial j}{\partial z} = 0$, т.е. ток не зависит от z . При анти-

вращении условие $\frac{\partial j_x}{\partial z} = \frac{\partial j_y}{\partial z} = 0$ требует обращения в нуль горизонталь-

ного тока в жидком ядре, поскольку j_x, j_y должны быть нечетными функциями от z . Нормальная компонента тока должна оставаться непрерывной при переходе через границу мантия—жидкое ядро. Следовательно, ток в жидком ядре будет направлен вдоль линий магнитного поля H и равен значению j_z на границе.

При ковращении потенциал электрического поля ϕ должен быть четной функцией от z , поэтому E_z и j_z оказываются нечетными функциями z . Поскольку ток в жидком ядре не зависит от z , то на границе мантия—жидкое ядро $j_z = 0$.

При реальных условиях (высокой температуре и высоком давлении) существования земного ядра твердую его часть можно считать высокопроводящим однородным шаром, состоящим из атомов железа [5,6], вместе с внешней жидкой частью ядра. Тогда с определенной степенью точности можно пренебречь горизонтальными токами в этой области ядра и считать токи текущими вдоль силовых линий магнитного поля Земли и (учитывая условие непрерывности на границе жидкое—твердое ядро) совпадающими с нормальными токами в жидкой части ядра.

Магнитные поля, создаваемые этими токами, ищем из уравнения $-\Delta h = \frac{4\pi}{c} \text{rot} j$, полученного взятием ротора от обеих частей уравне-

ния $\text{rot} h = \frac{4\pi}{c} \text{rot} j$. Однако это уравнение определяет h с точностью

до градиента произвольной функции ϕ , которая должна удовлетворять уравнению Лапласа, поскольку $\text{div} h = 0$. Имея это в виду, можно выбором определенной функции ϕ удовлетворить всем граничным условиям перехода магнитного поля h из одного слоя в другой [1].

Возмущение магнитного поля h , соответствующее току (7), в общем виде будет иметь вид

$$\begin{aligned} h_x &= Q_1(z, \sigma_1, \sigma_p, \sigma_H, k_1, k_2, m, A_i) \cdot \cos k_1 x \cdot \cos k_2 y + \\ &+ Q_2(z, \sigma_1, \sigma_p, \sigma_H, k_1, k_2, m, A_i) \cdot \sin k_1 x \cdot \sin k_2 y, \\ h_y &= Q_3(z, \sigma_1, \sigma_p, \sigma_H, k_1, k_2, m, A_i) \cdot \cos k_1 x \cdot \cos k_2 y + \\ &+ Q_4(z, \sigma_1, \sigma_p, \sigma_H, k_1, k_2, m, A_i) \cdot \sin k_1 x \cdot \sin k_2 y, \\ h_z &= Q_5(z, \sigma_1, \sigma_p, \sigma_H, k_1, k_2, m, A_i) \cdot \sin k_1 x \cdot \cos k_2 y. \end{aligned}$$

Эти выражения с соответствующими значениями проводимостей, постоянной экспоненты m , произвольных постоянных $A_i (i=1,2,\dots)$ относятся соответственно к слоям коры и мантии.

Магнитное поле h в жидком и твердом ядре имеет вид

$$\begin{aligned}
h_x &= Q_6(z, \sigma_1, \sigma_p, \sigma_H, k_1, k_2, m, A_1) \cdot \cos k_1 x \cdot \cos k_2 y + \\
&\quad + Q_7(z, \sigma_1, \sigma_p, \sigma_H, k_1, k_2, m, A_1) \cdot \sin k_1 x \cdot \sin k_2 y, \\
h_y &= Q_8(z, \sigma_1, \sigma_p, \sigma_H, k_1, k_2, m, A_1) \cdot \cos k_1 x \cdot \cos k_2 y + \\
&\quad + Q_9(z, \sigma_1, \sigma_p, \sigma_H, k_1, k_2, m, A_1) \cdot \sin k_1 x \cdot \sin k_2 y \\
h_z &= Q_{10}(z, \sigma_1, \sigma_p, \sigma_H, k_1, k_2, m, A_1) \cdot \sin k_1 x \cdot \cos k_2 y.
\end{aligned}$$

Значения Q_i и их детальный анализ из-за громоздкости выражений будут приведены в следующей работе.

Плотность зарядов поляризации в коре и мантии из уравнений Пуассона выразится формулой

$$\begin{aligned}
\rho = -\frac{1}{4\pi} \left\{ A_1 e^{(t-\frac{m}{2})\varepsilon} \left[\left(t - \frac{m}{2} \right)^2 \sigma_p / \sigma_1 + \left(t - \frac{m}{2} \right) \left(\sqrt{\sigma_p / \sigma_1} \right)' - k^2 \right] + \right. \\
\left. + A_2 e^{-(t+\frac{m}{2})\varepsilon} \cdot \left[\left(t + \frac{m}{2} \right)^2 \sigma_p / \sigma_1 - \left(t + \frac{m}{2} \right) \left(\sqrt{\sigma_p / \sigma_1} \right)' - k^2 \right] \right\}.
\end{aligned}$$

Понятно, что все произвольные постоянные, входящие в выражения настоящей работы, а также и работы [2], теперь уже будут определяться из граничных условий между слоями всей системы, охватывающей околоземное космическое пространство и внутреннее строение Земли.

Как видно из выражений магнитного поля h , туда входят проводимости, характеризующие электрические свойства соответствующих слоев. Допуская, что нам известны (с определенными оговорками) проводимости ядра и мантии, т. е. железа и силикатов [6, 7], которые составляют основную массу названных слоев, мы тогда получим возмущение магнитного поля в зависимости от проводимости коры. Это позволяет нам сделать важные физические выводы, подробное изложение которых приводится ниже.

Таким образом, в работе показано, что электрические процессы в околоземном космическом пространстве взаимодействуют с электропроводящей Землей и влияют на ее внутреннее электродинамическое состояние. В частности, изучена задача генерации электрических полей и токов в недрах Земли под влиянием механизма динамо мелко-масштабных процессов в ионосфере. Здесь же рассмотрена возможность просачивания электрических полей из атмосферы во внутренние слои Земли и возникновения токов. При этом вычислены электрические поля, токи и создаваемые ими магнитные поля, а также плотность зарядов поляризации в каждом из слоев в зависимости от продольной проводимости и проводимостей Педерсена и Холла. Причем возбуждаемые магнитные поля вносят свой вклад в магнитные вариации поля Земли и могут дать определенную информацию о ее геологическом строении. Поскольку, в отличие от дальнего зондирования, которое основано на скин-эффекте направленных волн и способно исследовать земную поверхность на глубине порядка нескольких метров, сама постановка настоящей задачи (в приближении предложенной модели)

позволяет исследовать всю глубину Земли (от центра до ее поверхности).

Кроме того, магнитные вариации поля Земли могут дать информацию и о ее сейсмическом состоянии, поскольку рассматриваемая задача стационарна, т. е. обратима, и возмущения в ионосфере можно рассматривать как следствие возмущений в недрах Земли.

И, наконец, магнитные вариации поля Земли могут быть использованы для изучения природных ресурсов (геологических исследований), так как методы выделения различных типов возмущений хорошо разработаны [7]. Для этого необходимо на испытательных полигонах по полученным формулам произвести калибровку магнитометров и обработать результаты магнитных измерений.

Однако, предложенная модель внутреннего строения Земли требует дополнительного изучения и усовершенствования с учетом физико-химических свойств каждого из слоев и физических условий их существования. Это позволит получить более точные, практически важные результаты. Поэтому дальнейшая работа автора настоящей статьи будет посвящена этой проблеме.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. М. Алексеева, Ю. С. Варданян, Б. А. Твердской. Геомагнетизм и аэрономия, 9, 437 (1969).
2. Ю. С. Варданян. Известия АН Арм. ССР, Физика, 27, 163 (1992).
3. Б. Н. Гершман. Динамика ионосферной плазмы. М., Наука, 1974.
4. Ю. С. Варданян. Геомагнетизм и аэрономия, 17, 1012 (1977).
5. У. Кауфман. Планеты и луны. М., Мир, 1972.
6. В. Н. Жарков. Внутреннее строение Земли и планет. М., Наука, 1983.
7. А. Нишида. Геомагнитный диагноз магнитосферы. М., Мир, 1980.

SMALL-SCALE DYNAMO OF COMPLETE MODEL FOR THE EARTH'S GAS SHELL (UP TO THE EXTERNAL BOUNDARY OF MAGNETOSPHERE) AND FOR ITS INTERNAL LAYERED STRUCTURE

YU. S. VARDANYAN

Small-scale dynamo is considered in the paper, in a complete model of near-Earth space (up to the external boundary of magnetosphere) and internal layered structure of Earth. In the framework of proposed model we have obtained the expressions for electric fields, currents and magnetic fields created by these currents.

ԵՐԿՐԻ ԳԱԶԱՅԻՆ ԹԱՂԱՆԹԻ (ԸՆԴՀՈՒՊ ՄԻՆՉԵՎ ՄԱԳՆԵՏՈՒՈՐՏԻ
ԱՐՏԱՔԻՆ ՍԱՀՄԱՆԸ) ԵՎ ՆՐԱ ՆԵՐՔԻՆ ԾԵՐՏԱՎՈՐ ԿԱՌՈՒՅՎԱԾՔԻ
ԼՐԻՎ ՄՈԴԵԼԻ ՄԱՆՐԱԶԱՔ ԴԻՆԱՄՈՆ

ՅՈՒ. Ս. ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ

Աշխատանքում դիտարկված է մերձերկրյա տիեզերական տարածության (ընդհուպ մինչև մագնիտոսֆերի արտաքին սահմանը) և երկրի ներքին շերտավոր կառուցվածքի մանրաշափ դինամոն: Առաջարկված մոդելի սահմաններում հաշվված են էլեկտրական դաշտերը, հոսանքները և նրանց կողմից առաջացրած մագնիսական դաշտերը: