

РГБ ОА
23 ноя 1998

На правах рукописи

ПЛОТНИКОВ Игорь Яковлевич



ГЕНЕРАЦИЯ ИОНОСФЕРНЫХ ТОКОВ
ВЯЗКИМ ТЕЧЕНИЕМ
ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ МАГНИТОСФЕРЫ

Специальность 04.00.23 —
"Физика атмосферы и гидросферы"

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Якутск — 1998

Работа выполнена в Институте космофизических исследований и астрономии Сибирского отделения Российской Академии Наук (ИКФИА СО РАН).

Научный руководитель — академик РАН
Г.Ф. Крымский
(ИКФИА СО РАН)

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор **В.С. Семенов**
(Научно-исследовательский
физический институт
Санкт-Петербургского
государственного университета);
доктор физико-математических наук,
М.Г. Гельберг
(ИКФИА СО РАН)


Ведущая организация — Научно-исследовательский институт
ядерной физики им. Д.В. Скобельцина
Московского государственного
университета им. М.В. Ломоносова

Защита диссертации состоится в 10⁰⁰ 16. 12. 1998 г.
на заседании Диссертационного совета К 200.40.01 в ИКФИА СО РАН по
адресу: 677891, г. Якутск, пр. Ленина 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИКФИА СО РАН.

Автореферат разослан 11. 11. 1998 г

Ученый секретарь Диссертационного совета
кандидат физико-математических наук

 **Л.П. Шадрин**

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы. Исследование процессов переноса заряда, импульса и энергии частиц в околоземном пространстве является одним из актуальных направлений в современной физике поперосферы и магнитосферы.

Следствия переносов частиц, а в особенности, генерация электрических токов, играют важную роль в протекании различных физических явлений в ионосферно – магнитосферном взаимодействии. Связанные с токами магнитные эффекты повсеместно регистрируются в различных областях ближнего космоса. Их непосредственное действие, формирующее, как физический объект магнитосферу, установлено по данным космических измерений в окрестностях Земли и по результатам исследований ряда других планет.

Энергоемкость магнитосферных токов сравнима с энергией корпускулярного воздействия Солнца на верхнюю атмосферу Земли. Поэтому электрические токи являются важнейшим динамическим фактором состояния солнечно – земных связей в полярных регионах, где ослаблена эффективность волновой солнечной радиации.

Выполненные к настоящему времени исследования процесса генерации высокоширотных магнитосферных токов ограничиваются рассмотрением локального подхода и ряда других приближений, адекватность которых трудно заранее оценить. В случае с электрическими токами основным эффектом является дальное действие, широко распространенное в магнитной гидродинамике. Соответствующее этому согласованное описание токов на магнитопаузе и в ионосфере, в котором учтено, что первая из структур выполняет функцию источника, а другая функцию нагрузки, может быть последовательным и содержательным в рамках более глобального функционального подхода.

Основной целью диссертации является теоретическое исследование процесса стационарной передачи энергии солнечного ветра во внешнюю магнитосферу с последовательным учетом магнитогидродинамических (МГД) и дальнедействующих эффектов.

Научная новизна работы состоит в том, что в ней впервые проведено теоретическое исследование замкнутой системы процессов генерации электрического поля и тока вязким течением плазмы в пограничном слое магнитосферы на основе МГД – моделирования электродвижущих сил (ЭДС) обтекания солнечным ветром магнитопаузы с учетом всех основных факторов, влияющих на формирование ЭДС, таких, как диссипатив-

ность, дальное действие, конечность размеров пограничного слоя и неоднородность ориентации геомагнитного поля вблизи магнитосферной границы.

Впервые установлен и объяснен эффект противотечения, заключающийся в немонотонном профиле вязкого течения вблизи обтекаемой магнитной стенки: в промежуточной области между неподвижной стенкой и обтекающим ее внешним потоком могут формироваться возвратные магнитогидродинамические струи.

Впервые установлено, что стационарно ограниченное протекание солнечного ветра в магнитосфере определяется уровнем ионосферной проводимости и мало зависит от уровня проводимости солнечного ветра.

Показано, что образование двух пограничных слоев: низкоширотного и высокоширотного, согласуется с неоднородной ориентацией геомагнитного поля вблизи магнитосферной границы.

Впервые показано, что регулярные закономерности наблюдаемых вблизи магнитопаузы профилей течения и магнитного поля, а также связь низкоширотного и высокоширотного пограничных слоев с областями I и III токов и расположение их в высокоширотной ионосфере удовлетворительно описываются МГД – моделью генерации ЭДС вязким потоком солнечного ветра, обтекающим магнитосферу.

Научная и практическая ценность работы заключается в том, что развитая в ней теория позволяет правильно понять и количественно предсказать закономерности явления генерации магнитосферно – ионосферных токов течением солнечного ветра в магнитопаузе.

Автор выносит на защиту:

1. МГД – модель вязкого течения с генерацией электрических токов в нагрузке, которая описывает новый электростатический эффект взаимодействия проводящей жидкости и магнитного поля, состоящий в разделении потока на антипараллельные струи с поперечными размерами, зависящими от относительной эффективности диссипативных процессов в генераторе и нагрузке.
2. Результаты приложения описанной МГД – модели к магнитосфере, выявившие зависимости протяженности хвоста и масштабов течений в пограничном слое от токов замыкания в ионосфере, состоящие в их регулировании пропорциональном ее электропроводности, а также результаты анализа экспериментальных данных, показывающие, что обнаруженные по космическим измерениям плазмы и поля не-

однородности в магнитопаузе отвечают сдвиговому характеру течения и обусловлены передачей в ионосферу энергии солнечного ветра в форме электрических токов.

3. Результаты расчетов, свидетельствующие о важной роли фактора неоднородности конфигурации геомагнитного поля на магнитопаузе в протекании процесса передачи импульса солнечного ветра на ионосферный уровень, а также результаты анализа экспериментальных данных, показывающие, что наблюдаемые особенности широтной стратификации пограничных слоев удовлетворительно воспроизводятся моделями генерации высокоширотных ионосферных токов I и III.
4. Результаты исследования зависимости площади поперечного сечения магнитосферного пограничного слоя от режимов генерации ЭДС, показывающие, что величина площади определяется ионосферной проводимостью в режиме генерации электрического тока и магнитосферной проводимостью в режиме генерации напряжения.

Личный вклад автора. Автор активно участвовал в постановке задачи и в выборе методов ее решения. Вклад автора в разработке аналитического решения задачи, осуществлении расчетов и анализе результатов является определяющим.

Апробация. Результаты, вошедшие в диссертацию, обсуждались и докладывались на Международных симпозиумах КАПГ по солнечно – земной физике (Ашхабад, 1979), 5-th General Assembly IAGA/IAMAP (Prague, 1985), по полярным геомагнитным явлениям (Суздаль, 1989), 30 th COSPAR Scientific Assembly (Hamburg, 1994); на VII Всесоюзной школе – семинаре по ОНЧ (Якутск, 1985); на Всесоюзном семинаре моделей ближнего космоса (Москва, 1993); на российских научных ХУП (1994), ХУП (1995) ежегодных Апатитских семинарах (Апатиты); на научных семинарах в институте ИКФИА, а также опубликованы в работах [1] – [10].

Публикации. Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 10 работах, список которых приведен в конце автореферата.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и содержит 86 страниц, 10 рисунков и библиографический список использованной литературы из 39 публикаций.

Содержание работы

В первой главе диссертации выполнена постановка стационарной задачи ЭДС, производимой в окрестности лобовой точки магнитосферы обтекающим ее солнечным ветром на основе магнитогидродинамического подхода.

Модельное описание профилей магнитного поля $\{0, 0, \mathbf{V}(x)\}$ и ЭДС $[\mathbf{V} \times \mathbf{B}]$ основано на уравнении магнитной индукции в кинематическом приближении:

$$\lambda \frac{d^2 B}{dx^2} + 4ax \frac{dB}{dx} + 2aB = 0,$$

где λ — коэффициент диффузии магнитного поля, a — произвольный с размерностью градиента скорости множитель в заданном несжимаемом течении $\mathbf{V} = \{-4ax, 2ay, 2az\}$.

В уравнении для области магнитосферной границы пренебрегается неоднородностями по всем координатам, кроме поперечной в граничном слое толщиной $d \approx \lambda/u \ll R$, что соответствует приближению плоской магнитопаузы, где u — скорость солнечного ветра и R — характерный размер магнитосферы.

Принято, что в лобовой магнитопаузе имеется особая точка $\{0, 0, 0\}$, где $V = 0$ и в окрестности которой формируется обтекание магнитного препятствия вязким потоком. При этом магнитопауза трактуется как слой электрического тока $\mathbf{j} = (1/\mu_0)\text{rot}\mathbf{B}$ с непротекаемой внутрь магнитосферы границей $x = 0$, где μ_0 — магнитная проницаемость. Задача решается при значении $a \approx u^2/\lambda$ и граничных условиях $B(x=0) = B_0$ и $(dB/dx)|_{(x=0)} = 0$, где B_0 — магнитная индукция в дневной области внешней магнитосферы.

Из двух различающихся распределениями вихревой $\text{rot}[\mathbf{V} \times \mathbf{B}] \neq 0$ и потенциальной $\text{div}[\mathbf{V} \times \mathbf{B}] \neq 0$ ЭДС по отношению к генерации ионосферных токов принимается во внимание только составляющая, связанная с плотностью зарядов $Q = \epsilon_0 \text{div}\mathbf{E} = -\epsilon_0 \text{div}[\mathbf{V} \times \mathbf{B}]$. Поэтому с учетом $\text{rot}\mathbf{V} = 0$ их возможный источник $\text{div}[\mathbf{V} \times \mathbf{B}] = \mathbf{V} \cdot \text{rot}[\mathbf{B}] - \mathbf{B} \cdot \text{rot}[\mathbf{V}]$ состоит из двух компонент $-V_x B$ и $V_y B$, отличающихся направлениями дальнего действия ЭДС, первый поддерживает ток вдоль слоя и второй — поперек него.

Поскольку обтекающий магнитосферу поток содержит не только безвихревое течение, то задача решается при условии $d \gg D$ значительной по толщине магнитопаузы, где D — толщина пограничного сдвигового ($\text{rot}\mathbf{V} \neq 0$) течения вблизи ее внутренней границы. Этому условию отве-

чает малый эффект поперечного ЭДС

$$\mathbf{V} \cdot \text{rot}[\mathbf{B}] \ll \mathbf{B} \cdot \text{rot}[\mathbf{V}]$$

или пренебрежение в лобовой области магнитосферы источником поносферных токов.

Вторая глава диссертации посвящена изложению аналитического решения стационарной задачи генерации ЭДС и тока вязким МГД – течением применительно к низкоширотному пограничному слою (LLBL) в магнитосфере и связанной с ним вдоль геомагнитных силовых линий авроральной ионосфере. В рамках упрощений МГД – задачи Куэтта и сосредоточенных элементов внешней цепи изучается принцип генерации электрического тока сдвиговым течением и влияние поносферной проводимости на перенос импульса солнечного ветра в магнитосферу.

Теоретическое описание основано на законе Ома $\mathbf{j} = \sigma(\mathbf{E} + [\mathbf{V} \times \mathbf{B}])$ и уравнениях непрерывности электрического тока

$$\text{div} \mathbf{j} = 0$$

и движения вязкого потока

$$\eta \frac{d^2 V}{dx^2} + j B_0 = 0$$

со скоростью $\mathbf{V} = \{0, V(x), 0\}$ в магнитном поле $\mathbf{B} = \{0, B(z), B_0\}$, где B_0 – однородное приложенное магнитное поле, σ и η – коэффициенты проводимости и вязкости.

Распределение давления P вдоль течения во внимание не принимается. С учетом соотношений $D \ll 2l \ll R$ ($2l$ – ширина) параметров поперечного сечения и $L \gg R$ протяженности в уравнениях для тонкого слоя пренебрегается элементами кривизны, что соответствует приближению прямолинейного течения. При этом известное по экспериментам в области LLBL сдвиговое течение магнитосферной плазмы трактуется как поток между подвижной ($x = 0$) и неподвижной ($x = D$) стенками бесконечно длинной трубы с прямоугольным сечением $D \times 2l$.

Поскольку магнитопауза в области LLBL является единственным источником, где осуществляется передача импульса движения обтекающего ее солнечного ветра в магнитосферную плазму, задача решается при граничных условиях

$$V(0) = V_0 \quad \text{и} \quad V(D) = 0,$$

которые означают прилипание частиц к подвижной и неподвижной стенкам, которые трактуются как магнитопауза и потокопауза. Прилипание

отсутствует вблизи двух других границ $z = l$ и $z = -l$, соответствующих контакту LLBL с высокоширотным пограничным слоем (мантейей).

Граничные условия

$$\phi(0) = 0 \quad \text{и} \quad \phi(D) = \frac{2\sigma r l L}{D} \left(V_0 B_0 D - \frac{d\phi}{dx} \Big|_{x=D} \right)$$

для электрического потенциала ($E = -\text{grad}\phi$) в режиме генерации тока отвечают равенству токов во внутренних и внешних цепях, которые представляют генератор LLBL и ионосферную нагрузку с сопротивлением r .

На рис. 1 (соответствует рис. 2.2 в диссертации) представлены профили безразмерных скоростей $v = V/V_0$ и электрических потенциалов $Y = \phi/V_0 B_0 D$ по ширине трубы в двух физически принципиально различных условиях. Верхнее распределение соответствует МГД - потоку, не создающему вязких напряжений на неподвижной стенке, совпадающей с линией $\zeta = -1$, где $\zeta = 1 - 2x/D$. Это условие характеризуется соотношением $\nu = (4/3)Ha^2 - 2$ между сопротивлением нагрузки и геометрическими и физическими параметрами для области течения, где $\nu = 2\sigma r l L/D$, $Ha = B_0 D \sqrt{\sigma/\eta}$ - число Гартмана. Нижние профили образуются при коротко замкнутой ($\nu = 0$) нагрузке. Немонотонное распределение скорости v объединяет поток увлеченный подвижной стенкой $\zeta = 1$ и противотечение вблизи неподвижной стенки $\zeta = -1$.

Эффект противотечения ассоциируется с существующей в магнитосфере конвекцией плазмы в солнечном направлении. Известная гипотеза Аксфорда и Хайнса (Axford W.I., Hines C.O., Canad. J. Phys., 1961., N. 39., P.1433) о вязком обтекании магнитосферы солнечным ветром непротиворечиво развивается в полученных решениях простейшего МГД - механизма с учетом джоулевой диссипации в ионосфере. Вместо проводимости в характеристическом числе Гартмана $Ha_*^2 = B_0^2 D^3 / l L r \eta$ содержится геометрический фактор D/lL внутреннего сопротивления генератора и сопротивление r ионосферной нагрузки.

Оценка длины магнитосферного хвоста составляет $\approx 10^2 R_E$, где R_E - радиус Земли. Приведенная оценка находится в удовлетворительном согласии с величиной 1 : 8 полуденно - полуночной асимметрии распределения магнитосферного поля, измеренного на космических аппаратах до расстояний $> 80 R_E$ от Земли (Fairfield D.H., J. Geophys. Res., 1993., V.98., N. 12., P.21265).

В третьей главе диссертации задача согласованной генерации ЭДС и тока решается для квазивязкого течения в низкоширотном пограничном слое магнитосферы в связи с генерацией утренне - вечерних магнитосферно - ионосферных токов и продольных токов в полярной шапке. В

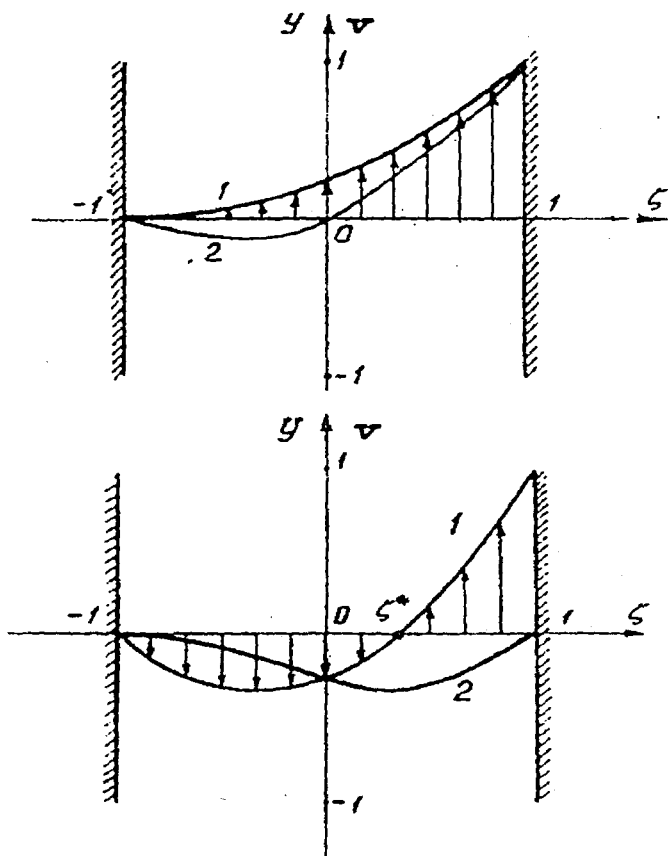


Рис. 1. Профили скоростей v и электрических потенциалов Y двух вязких потоков, один из которых со свободной границей (верхний график) и другой с коротко замкнутой нагрузкой (нижний график): ζ – безразмерная координата по ширине трубы; ζ^* – точка контакта увлекаемого потока и противотечения.

отличие от простейшей модели МГД – течения в трубе здесь исследуется роль распределенных магнитосферных токов в стационарном эффекте свободной границы вязкого потока, т.е. в естественно ограниченном LLBL по толщине.

Рассмотрение механизма магнитосферно – ионосферного взаимодействия проведено на основе системы уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{dI}{dx} + j_M &= 0 \\ \frac{dI_1}{dx} + j_M &= 0 \\ I\rho + I_1\rho_1 &= \mathcal{E} \\ \int_0^D I\rho dx + I_0\rho_0 L_0 &= \int_0^D \mathcal{E} dx, \end{aligned}$$

полученной для электрических цепей по правилам Кирхгофа, где j_M – поверхностная плотность магнитосферного тока; I_0 и I_1 – полные токи в ионосфере авроральной и полярной шапки; I_M и I – полные токи в магнитосферном пограничном слое на высоких и низких широтах; \mathcal{E} – ЭДС в LLBL; $2L_0$ – диаметр полярной шапки; $\rho = 1/L\sigma$, $\rho_0 = 1/2L_0h\sigma_0$ и $\rho_1 = 1/L_0h\sigma_1$ – погонные сопротивления в слое, авроральной ионосфере и ионосфере полярной шапки; h – толщина ионосферы; σ_1 – проводимость ионосферы в полярной шапке; ось Ox направлена по нормали к слою.

Из глобальной магнитосферно – ионосферной токовой системы учитываются только токи I и III по Иджима и Потемра утреннего и вечернего секторов местного времени. Интенсивность токов I в каждом из секторов авроральной области описывается величиной $I(D)$. Токи I на ионосферном уровне замыкаются током I_0 , а на уровне высокоширотной магнитопаузы – противоположно направленным I_M . Образуется замкнутая система связывающая утренние – вечерние токи.

Кроме того, независимо для каждого из секторов допускается распределенный ток j_M утечки из LLBL, который питает ионосферный ток I_1 в области полярной шапки. Считается, что эффект утечки замкнут с током магнитопаузы посредством полярного тока III в области дневного каспа и магнитосферным током I в экваториальном слое.

Для распределенных токов заданы граничные условия $I_M = I_0$ и $I(0) = I_1(0) + I_M$. Генерация распределения ЭДС в LLBL описывается уравнением динамического равновесия магнитных и вязких сил при обычных красных условиях $\mathcal{E}(0) = \mathcal{E}_0$ и $\mathcal{E}(D) = 0$, дополненных соотношением $(dV/dx)|_{x=D} = 0$ для свободной поверхности вязкого течения на потокопаузе.

При этом стационарная толщина D_0 слоя определяется решением трансцендентного уравнения

$$\text{sh}(\delta D_0) = \delta(1 + \rho/\rho_1)(D_0 + L_0\rho_0/\rho_1),$$

где $\delta^2 \approx B_0^2/lR_M\eta(\rho_1 + \rho)$. В соответствии с приближенным решением $D_0 \approx L_0\rho_0(\rho + \rho_1)/\rho_1^2$, она сравнима с размером ионосферной токовой системы. Это удовлетворительно согласуется с характеристиками LLBL, определенными по данным измерений на космических аппаратах.

В четвертой главе диссертации решается задача стационарной генерации ЭДС квазивязким потоком солнечного ветра, обтекающим магнитосферный касп в приближении плоского слоя. Дается магнитогидродинамическое описание мантийной структуры в дневном каспе. Исследуется влияние неоднородности геомагнитного поля в магнитопаузе и ионосферного шунтирования магнитосферных токов III на характеристики расхода течения в высокоширотном пограничном слое.

Рассматривается прямолинейное сдвиговое МГД - течение $\mathbf{V} = \{0, 0, V(x)\}$ в слое с толщиной D в трехмерном приложенном магнитном поле $\mathbf{B}_0 = \{cx, -ksy, (\kappa - 1)cz\}$ с каспеной особенностью в точке $(0, 0, 0)$. Здесь использованы координаты правосторонней системы с осями, соответственно, направленными x - поперек слоя к Земле, y - по поверхности магнитопаузы в утреннюю сторону и z - вдоль потока, обтекающего магнитосферу, $c = M/R^4$ - параметр неоднородности поля каспа, M - магнитный момент Земли, $R = 20R_E$ - расстояние от каспа до Земли и κ - параметр эллиптичности изолинии $B_0 = \text{const}$ или пятна каспа на плоскости $x = \text{const}$.

В отличие от предыдущей главы, в расчетах стационарных ионосферно - магнитосферных токов I , I_0 и I_1 используется уравнение $\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0$ для потенциального электрического поля, генерированного плотностью ЭДС $\mathcal{E}(x) = [\mathbf{V} \times (\mathbf{B} + \mathbf{B}_0)]$, где $\mathbf{B} = \{0, 0, B(x)\}$ - магнитная индукция, обусловленная плотностью тока в мантии. Здесь принято, что ионосферный ток I_1 замыкает ток III утреннего и вечернего секторов местного времени, а противоположно направленный ток $I = (L/\mu_0)[B(0) - B(D)]$ замыкает их на уровне мантии в дневном каспе, где L - длина слоя вдоль потока. При этом внешний ток I_0 и сопротивление \mathcal{R}_0 являются характеристиками возможного электродинамического взаимодействия между источниками ЭДС мантии и LLBL.

Полуширина слоя квазивязкого течения в каспе определяется выражением

$$\ell = (\sigma A - 1) \mathcal{R}_0 / 2\rho_1, \quad (1)$$

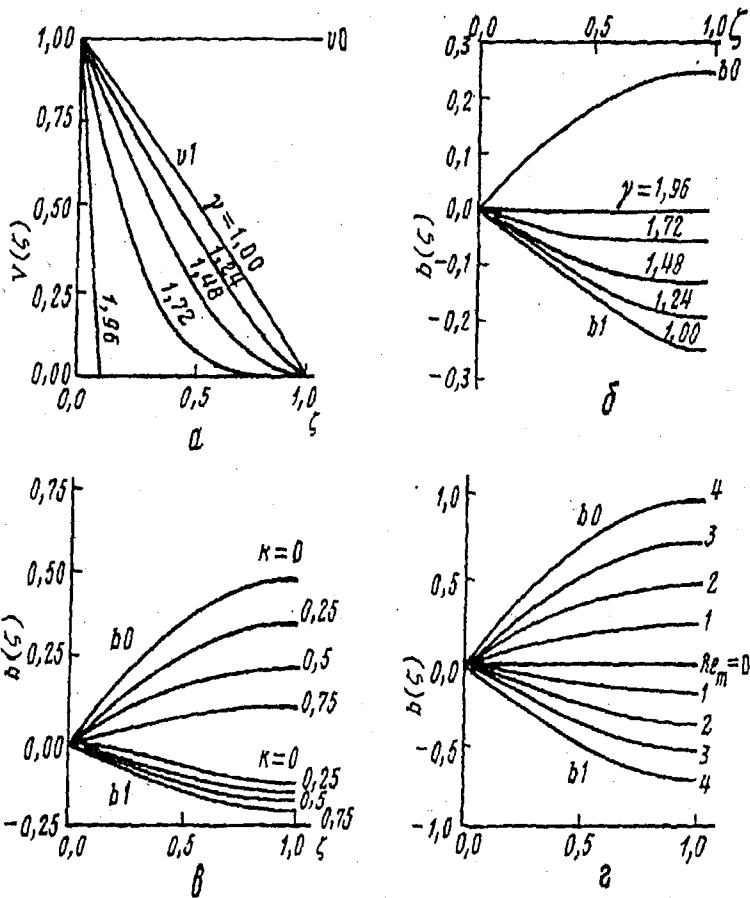


Рис. 2. Профили скорости (а) течения и индуцированного магнитного поля (б-г) в дневном каспе, рассчитанные при различных значениях параметров γ , κ и магнитного числа Рейнольдса Re_m .

где параметр

$$A = \left\{ \rho_1 L [B(0) - B(D)] + \mu_0 c \kappa \int_0^D V dx \right\} / \frac{dB}{dx} \Big|_{x=0}$$

имеет размерность удельного опротивления и считается приведенным удельным сопротивлением плазмы в магнитоферном мантии.

Распределение ЭДС слоя описывается на основе частных решений МГД-уравнений индукции, движения и энергии:

$$\lambda \Delta \mathbf{B} + \text{rot} [\mathbf{V} \times (\mathbf{B} + \mathbf{B}_0)] = 0$$

$$\eta \Delta \mathbf{V} + [\mathbf{j} \times (\mathbf{B} + \mathbf{B}_0)] - \nabla P = 0$$

$$(\mathbf{V} \nabla) P - (\gamma - 1) [\eta (\text{rot} \mathbf{V})^2 + (\text{rot} \mathbf{B})^2 / \mu_0^2 \sigma] = 0,$$

которые удовлетворяют граничным условиями $V(0) = V_0$, $B(0) = 0$ в магнитопаузе и $(\partial P / \partial x)|_D = 0$, $(dV/dx)|_D = 0$ в потокопаузе. Здесь γ - отношение удельных теплоемкостей, а двумя последними равенствами в условиях задается потокопауза — стационарная свободная граница $x = D$ для вязкого потока.

На рис. 2 (соответствует рис. 4.2 в диссертации) представлены безразмерные скорость $v(\zeta) = V(x/D)/V_0$ и магнитное поле $b(\zeta) = B(x/D)/cD$ в кинематическом приближении, при $Ha = 0$ или предельно вязком потоке плазмы в каспе. Кривые, обозначенные b_0 , соответствуют однородному потоку v_0 , и b_1 — сдвиговому потоку v_1 .

Интересной особенностью условий в каспе является то, что при отсутствии соотношения $V(D) = 0$, описывающего "прилипание" вязкого потока на границе, допускаются динамическая ($V(D) \neq 0$ при $(\partial P / \partial z)|_D = 0$) и статическая ($V(D) = 0$ при $(\partial P / \partial z)|_D \neq 0$) потокопаузы. В первом варианте, проанализированном в работе Трошичева (Трошичев О.А. Магнитосферные исследования., 1983., N₂2., С.54) считается, что однородное течение в пограничном слое происходит от внешнего избыточного давления в лобовой области магнитосферы.

Во-втором варианте сингулярное на границе $x = D$ уравнение энергии регуляризуется при соотношении

$$Ha_*^2 = \frac{(1 - \kappa)^2}{8\gamma^3} [(2 - \gamma)(4\gamma^2 - 4\gamma + 9)^{3/2} - 16\gamma^4 + 32\gamma^3 + 56\gamma^2 - 72\gamma + 27],$$

с учетом которого рассчитывается толщина $D_* = \sqrt{Ha_* \sqrt{\lambda \eta} / c}$ равновесного сдвигового течения в каспе.

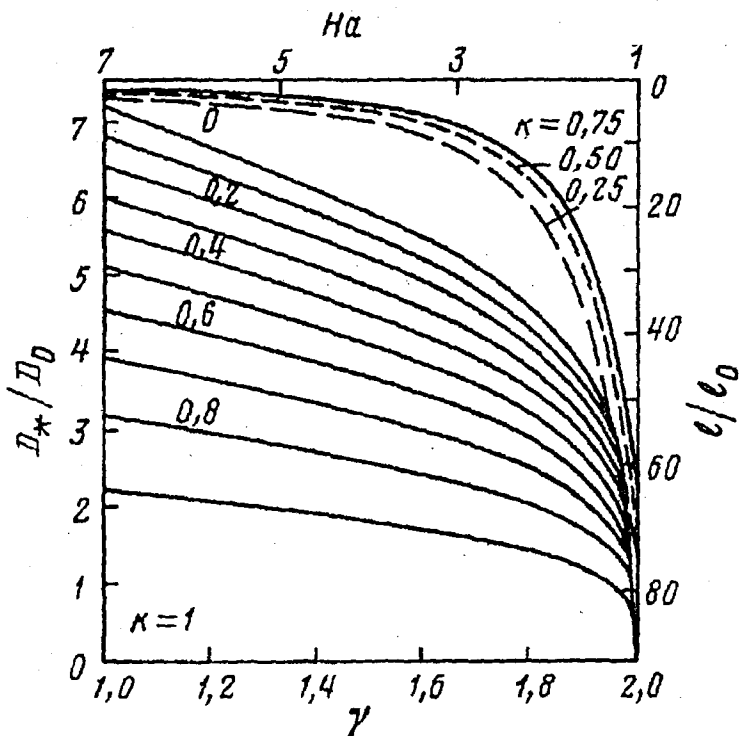


Рис. 3. Зависимости толщины D_* и полуширины l мантии в каспе, соответственно, от отношения теплоемкостей γ и от числа Гартмана Na при различных значениях параметра формы каспа κ .

На рис. 3 (соответствует рис. 4.3 в диссертации) это иллюстрируется зависимостью относительной толщины D_*/D_0 от γ при наборе параметров $\kappa = 0.1, 0.2 \dots 0.6$, где D_0 - толщина LLBL. Качественно зависимость (нижние кривые) имеет отрицательный коэффициент линейной связи, такой, что максимальное отношение ≈ 7 толщин высоко- и низкоширотных пограничных слоев отвечает протермическому ($\gamma = 1$) течению. Приведенная оценка удовлетворительно согласуется с определениями толщины мантии и LLBL в космических экспериментах (Paschmann G. et al., D.Reidel, Hingham, Mass., 1974., P.249) и (Rosenbauer H. et al., J. Geophys. Res., 1975., V.80, N₂A19, P.2723).

Расчеты по формуле (1) представлены в правом верхнем углу на рис. 3 (3 верхние кривые) зависимостью относительной полуширины ℓ/l_0 от Ha при низкой ионосферной проводимости ($\rho_1 \gg \rho$), полуширине $l_0 = R_0/2\rho Re_m$ и наборе параметров $\kappa = 0.25, 0.5, 0.75$. Качественно зависимость близка к обратной пропорциональности. Видно, что с учетом динамики ионосферной проводимости проявляется ее влияние на площадь сечения $\ell_0 \times D_*$ каспеного потока плазмы и наряду с внешними причинами, известными по экспериментам, теория мантии предсказывает вариации массового расхода плазмы магнитосферного происхождения.

Заключение

В работе выполнено теоретическое исследование магнитогидродинамического процесса передачи импульса солнечного ветра в ионосферу и согласованной генерации электрического поля и токов в магнитосфере.

Основные результаты, полученные в диссертации, можно сформулировать следующим образом:

1. Впервые поставлена и решена задача согласованного описания процесса вязкой генерации электрического поля и токов применительно к магнитосферному пограничному слою и хвосту в рамках магнитогидродинамического подхода с использованием правил Кирхгофа, которые позволяют получать замкнутое решение задачи.

2. Впервые установлен и объяснен эффект противотечения, заключающийся в немонотонном профиле вязкого течения вблизи обтекаемой магнитной стенки: в промежуточной области между неподвижной стенкой и обтекающим ее внешним потоком могут формироваться возвратные магнитогидродинамические струи.

3. Впервые установлено, что в рамках магнитогидродинамического подхода стационарно ограниченное протекание солнечного ветра в магни-

тосфере определяется уровнем ионосферной проводимости и мало зависит от уровня проводимости солнечного ветра. Только наличие нестационарного механизма пересоединения земного и межпланетного магнитных полей может приводить к существенному увеличению потока энергии из солнечного ветра в магнитосферу и ионосферу.

4. Показано, что конечность анизотропии магнитосферной проводимости является основным фактором, который наряду с уровнем эффективной проводимости в пограничном слое определяет размеры областей I и III токов и их расположение в высокоширотной ионосфере.

5. Впервые показано, что регулярные закономерности наблюдаемых вблизи магнитопаузы профилей течения и магнитного поля удовлетворительно воспроизводятся в рамках магнитогидродинамического моделирования и соответствуют двум пограничным слоям: низкоширотному и высокоширотному, что согласуется с неоднородной ориентацией геомагнитного поля вблизи магнитосферной границы. Сравнение результатов расчета с измерениями пространственного распределения плотностей частиц, их массовой скорости и магнитного поля в магнитосферных пограничных слоях показало, что согласованная модель генерации ЭДС вязким потоком, основанная на магнитогидродинамическом подходе и включающая учет основных факторов, влияющих на процесс генерации электрического поля и токов (неоднородность ориентации магнитного поля, дальное действие и конечность анизотропии проводимости), адекватно объясняет особенности передачи энергии солнечного ветра в магнитосферу и ионосферу.

Библиографический список публикаций автора по теме диссертационного исследования

- [1] Плотников И.Я. О магнитосферном генераторе электрического тока. / Физика верхней атмосферы высоких широт. Результаты комплексных геофизических исследований. Якутск: ЯФ СОАН СССР. — 1975. — С.81–92.
- [2] Плотников И.Я. К вопросу о магнитосферном МГД – генераторе. / Физические процессы в верхней атмосфере высоких широт. Якутск: ЯФ СОАН СССР. — 1976. — С.83–97.

- [3] Плотников И.Я. Перенос электроэнергии в анизотропно – проводящей среде. / Бюллетень НТИ. Октябрь 1977. Якутск: ЯФ СОАН СССР. — 1977. — С.23–25.
- [4] Крымский Г.Ф., Плотников И.Я. Непрерывные решения МГД – уравнений в окрестности лобовой магнитопаузы. / Симпозиум КАПГ по солнечно – земной физике. Ашхабад. — 1979. — С.24–25.
- [5] Плотников И.Я. Пограничный слой магнитосферы и передача энергии в ионосферу. / Динамические характеристики естественных низкочастотных излучений. Якутск: ЯФ СОАН СССР. — 1987. — С.105–109.
- [6] Плотников И.Я. Вязкое течение в пограничном слое магнитосферы. // Геомагнетизм и аэронавтика. — 1989. — Т.29, — №5. — С.843–846.
- [7] Плотников И.Я. Функциональная модель пограничного слоя магнитосферы. / Международный симпозиум. "Полярные геомагнитные явления". Суздаль, 1989. Апатиты: КНЦ АН СССР. — 1989. — С.74–78.
- [8] Плотников И.Я. Вязкое течение плазмы в дневном каспе магнитосферы. / Исследование геофизических явлений в Якутии. Якутск. ЯНЦ СО РАН. — 1993. — С.38–45.
- [9] Плотников И.Я. Магнитный касп в вязком потоке плазме. / Математические модели ближнего космоса. Москва, 1993. М.: МГУ. — 1993. — С.6–7.
- [10] Плотников И.Я. Гидромагнитная модель дневного каспа земной магнитосферы. // Геомагнетизм и аэронавтика. — 1996. — Т.36, — №3. — С.50–58.

Подписано в печать 3.11.98 г. Заказ № 222

Формат $60 \times 84^{1/16}$.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Тираж 100 экз. Объем 1 п.л.

ГУП "Полиграфист".

677007, г. Якутск, ул. Петровского, 2.