

УДК 550.385.4: 551.510.535

М. А. Волков

Авроральная турбулентность ионосферной конвекции

M. A. Volkov

Auroral turbulence of the ionospheric convection

Аннотация. Исследован процесс формирования двумерных авроральных структур в холодной ионосферно-магнитосферной плазме в условиях конвекции. Возмущения в конвекции приводят к появлению токов, текущих поперек и вдоль магнитных силовых линий. Продольные токи, текущие из ионосферы в магнитосферу, обуславливают появление обратной положительной связи между возмущениями в магнитосфере и ионосфере. Ионосфера рассмотрена как тонкий проводящий неоднородный слой, учтен интегральный эффект от процессов ионизации и рекомбинации заряженных частиц. Процессы в ионосфере считались нелинейными, для изучения процессов в магнитосфере использовано линейное приближение, уравнение распространения альвеновской волны вдоль магнитного поля решено с учетом реалистичного профиля показателя преломления вдоль магнитной силовой линии. В ходе исследований установлено, что для умеренно возмущенных условий интегральная проводимость Холла равна 8 См, время нарастания авроральных возмущений с масштабами поперек магнитного поля в 1 км составляет ~60 с. Возмущения с меньшими поперечными масштабами развиваются быстрее. Тепловое движение частиц приводит к уменьшению инкремента развития неустойчивости и даже к подавлению этого развития.

Abstract. The formation of the two-dimensional auroral structures in the cold ionospheric-magnetospheric plasma under convection has been considered. The convection inhomogeneity leads to appearance of the currents across and along the magnetic field lines. The field-aligned currents flowing from the ionosphere into the magnetosphere create positive feedback between magnetospheric and ionospheric perturbations. The ionosphere is assumed as a thin conductive layer, and the processes of ionization and recombination of the charged particles have been considered. The ionospheric processes have been considered as non-linear. In the magnetosphere the linear approximation has been used. The linear equation for the Alfvén waves propagating along the magnetic field from the ionosphere to the magnetosphere has been solved with the realistic change of the velocity along the magnetic field lines. It has been found that for moderately disturbed conditions the integral Hall conductivity is equal to 8 S, rise time of auroral disturbances to scale the across the magnetic field of 1 km is ~60 s. The disturbances at the smaller scale have developed faster. The thermal motion of particles in the ionosphere leads to weakening and even suppressing the development of ionospheric disturbances.

Ключевые слова: ионосфера, авроральная дуга, продольные токи, альвеновские волны.

Key words: ionosphere, auroral arc, field-aligned currents, the Alfvén waves.

Введение

Механизмы обратной связи между движущейся плазмой в магнитосфере и ионосфере предсказаны в работах [1; 2]. В холодной плазме из-за столкновений с нейтральными частицами в ионосфере возникают возмущения электрического и магнитного полей, распространяющиеся вдоль магнитного поля из ионосферы в магнитосферу в форме альвеновской волны. Из-за поляризационных токов на краях области возмущения возникают продольные токи, которые направлены вдоль магнитного поля и могут приводить к возникновению продольного электрического поля, ускорению и высыпанию электронов в ионосферу. Данная обратная связь может стать положительной и привести к нарастанию возмущений. Исследования обратной связи проводятся, как правило, в приближении малых возмущений [3; 4]. Но даже в этом случае более точное решение этой задачи получается при использовании только численных методов, что связано с достаточно неоднородным профилем альвеновской скорости вдоль магнитной силовой линии. Значительные по величине продольные токи (10^{-5} А/м²) могут заметно модифицировать ионосферную проводимость, в то же время оказывая малое влияние на концентрацию холодной магнитосферной плазмы. Таким образом, процессы, описывающие обратную связь, могут быть нелинейными в ионосфере и линейными в магнитосфере. В рамках данного приближения с учетом реалистичного изменения альвеновской скорости вдоль магнитной силовой линии в настоящей работе численно исследовано развитие двумерного аврорального возмущения.

Описание ионосферы

Используем прямоугольную систему координат, ось y направим на запад, ось x – югу, ось z – вниз, вдоль магнитного поля (Северное полушарие). Рассмотрим двумерные возмущения, зависящие от x и z , т. е. $\partial/\partial y = 0$.

Уравнение непрерывности для электронов с учетом процессов ионизации и рекомбинации имеет следующий вид:

$$\partial n / \partial t + \partial (n v_{ex}) / \partial x = -\gamma / e \partial j_z / \partial z - r (n^2 - n_0^2), \quad (1)$$

где n , v_{ex} – концентрация и скорость электронов; n_0 – фоновое значение концентрации; r – коэффициент рекомбинации (квадратичный закон рекомбинации выполняется для высот E -слоя); j_z – продольный ток; e – заряд, равный заряду электрона; γ – коэффициент размножения пар ионов при ионизации.

Проанализируем процессы, длительность которых много больше 0.01 с. В этом случае из уравнения движения ионов получим следующее выражение для скорости:

$$v_{xi} = (-kT \partial \ln(n) / \partial x + e E_x) f(v_{in} / \omega_i) / m_i \omega_i, \quad (2)$$

где v_{xi} – скорость ионов; kT – тепловая энергия ионов; m_i – масса иона; n – концентрация ионов в ионосфере; v_{in} – частота столкновений ионов с нейтралами; ω_i – гирочастота ионов; E_x – напряженность x -компоненты электрического поля; $f(v_{in} / \omega_i) = (v_{in} / \omega_i) / (1 + (v_{in} / \omega_i)^2)$.

Уравнение непрерывности для тока в ионосфере имеет вид

$$\partial / \partial x (\sigma_p E_x - \sigma_h E_{0y}) = -\partial j_z / \partial z, \quad (3)$$

где σ_p , σ_h – ионосферные проводимости Педерсена и Холла; E_{0y} – электрическое поле ионосферно-магнитосферной конвекции.

Частоты столкновений электронов с нейтралами много меньше гирочастоты электронов в ионосфере, поэтому можно считать, что электроны движутся со скоростью конвекции $v_e = E_{0y} / B_0$, где B_0 – индукция магнитного поля в ионосфере. Ионосферные проводимости зависят от концентрации заряженных частиц и частот следующим образом:

$$\sigma_h = en / B_0, \quad \sigma_p / \sigma_h \approx f(v_{in} / \omega_i).$$

В дальнейшем будем рассматривать ионосферу как тонкий проводящий слой. Уравнения (1)–(3) проинтегрируем по толщине ионосферы h . Для этого зададим изменения концентрации с высотой s : $n(s) = n_0 \exp(-(s - s_0)^2 / h^2)$, где s_0 – высота максимума E -слоя, изменение функции f с высотой зададим похожим образом $f(s_0) = 0.5$ [5].

Проинтегрированные по толщине ионосферы уравнения (1), (3) запишем так:

$$\partial N / \partial t + E_{0y} / B_0 \partial N / \partial x = -\gamma j_z / e - r (N^2 - N_0^2) / (2^{3/2} h), \quad (4)$$

$$\partial / \partial x (e N E_x / (2^{3/2} B_0) - kT \partial \ln(N) / \partial x / (2^{3/2} e B_0) - e N E_{0y} / B_0) = j_z. \quad (5)$$

Описание магнитосферы

Магнитосферную плазму считаем холодной, возмущением концентрации плазмы пренебрегаем, продольные электрические поля равны нулю. Единственной компонентой возмущенного электрического поля является E_x , магнитного – H_y . Из уравнения движения для холодной плазмы в магнитном поле в системе координат, движущейся вместе с плазмой, получим выражение для поляризационного тока в альвеновской волне:

$$j_x = 1 / (\mu_0 v_a^2) \partial E_x / \partial t, \quad (6)$$

где μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; $v_a^2 = \rho \mu_0 / B^2$ – квадрат альвеновской скорости; ρ – плотность плазмы; B – индукция магнитного поля в магнитосфере.

Из уравнений Максвелла $\partial E_x / \partial z = -\mu_0 \partial H_y / \partial t$, $\partial H_y / \partial z = -j_x$, $\partial H_y / \partial x = j_z$ и уравнения непрерывности для тока $\partial j_z / \partial z = -\partial j_x / \partial x$ получим уравнения для E_x и j_z :

$$\partial^2 E_x / \partial z^2 = 1 / (v_a^2) \partial^2 E_x / \partial t^2, \quad (7)$$

$$\partial j_z / \partial t = -1 / (\mu_0) \partial^2 E_x / \partial z \partial x. \quad (8)$$

Магнитные силовые линии считаем прямыми, но расходящимися, пренебрегаем углом наклона магнитного поля Земли к ионосфере. Индукция магнитного поля изменяется с расстоянием r от центра Земли по закону $B = B_0 (r_3 / r)^3$, где r_3 – радиус Земли. Концентрация магнитосферной плазмы (протоны) $n = n_0 \exp(-(r / 2r_3)^2)$, где n_0 – концентрация в ионосфере. Профиль изменения альвеновской скорости от ионосферы $z = 0$ до экваториальной плоскости магнитосферы $z = -(r - r_3) / r_3 = -10$ показан на рис. 1. Значения z убывают с удалением от Земли (от верхней границы ионосферы). Концентрацию плазмы в ионосфере при $z = 0$ зададим равной $n_0 = 0.5 \cdot 10^{11} \text{ 1/м}^3$.

Граничные условия

Для решения уравнения (7) необходимо записать граничные условия для E_x на нижней (ионосфера) и верхней (экваториальная плоскость) границах. В движущейся системе координат уравнение (5) не меняется, а в уравнении (4) пропадает второе слагаемое в левой части. Получим условие на нижней границе. Продифференцируем уравнение (5) по времени, исключим ток j_z , воспользовавшись выражением (8), опустим производную по x , в итоге получим при $z = 0$

$$\partial E_x / \partial t = -(E_x - 2^{3/2} E_{0y}) \partial(\ln N) / \partial t - 2^{3/2} B_0 / (e \mu_0 N) \partial E_x / \partial z + kT / (e^2 N) \partial^2(\ln N) / \partial z \partial t. \quad (9)$$

На верхней границе при $z = -10$ зададим

$$\partial E_x / \partial z = 0. \quad (10)$$

Это условие определяет узел для магнитного поля на экваториальной границе ($E_x = 0$ – узел для электрического поля).

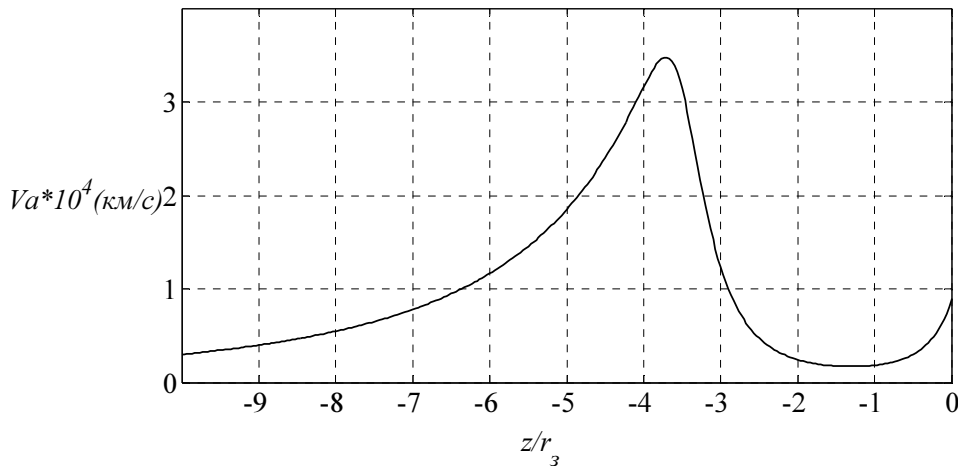


Рис. 1. Изменение альвеновской скорости вдоль магнитной силовой линии от ионосферы при $z = 0$ до экваториальной плоскости магнитосферы при $z = -10$

Результаты численного моделирования

Систему уравнений (4), (7), (8) при граничных условиях (9), (10) решим посредством численного интегрирования с шагом по времени $dt = 0.005$ с, с шагом по координатам $dx = 100$ м и $dz = 100$ км соответственно. Начальное возмущение компоненты E_x электрического поля (поле в падающей на ионосферу альвеновской волне) на ионосферном уровне длительностью $\tau = 4$ с зададим в форме гауссоиды по x :

$$E_x(x) = E_{x0} \exp(-((x-L)/2)/dL)^2), \quad (11)$$

где E_{x0} – амплитуда возмущения, заданная равной 5 мВ/м; $L = 100$ км – размеры области интегрирования по x ; dL – пространственный масштаб изменения начального возмущения по координате x ; $dL = v_{x0} \tau$, здесь $v_{x0} = E_0/B_0$ – скорость конвекции. Примем скорость конвекции $v_{x0} = 500$ м/с, получим $dL = 2$ км. На правой границе при $x = L$ выполняется условие

$$\partial E_x / \partial t - (dx/dt) \partial E_x / \partial z = 0. \quad (12)$$

Данное условие означает прозрачность правой границы области интегрирования.

На рис. 2, а, б, в приведены результаты численного моделирования концентрации N , компоненты E_x электрического поля, продольного тока j на ионосферном уровне в разные моменты времени. Расчет проведен с учетом значения параметра $\gamma = 10$, интегральной ионосферной проводимости Холла, равной 8 См, что соответствует достаточно возмущенным условиям. Время нарастания возмущений согласно приведенным расчетам составляет ~ 60 с, время распространения альвеновской волны до экваториальной плоскости и обратно – ~ 40 с. С уменьшением проводимости ионосферы время нарастания возмущений сокращается. Несмотря на значительные продольные токи, достигающие 10 А/км², изменение ионосферной электронной концентрации очень незначительно в приведенных расчетах, что связано с малым значением параметра γ , который определяет количество пар ионов, образующихся при ионизации одним электроном. В дугах сияний этот параметр может быть больше 100. Исследовано влияние диффузии на развитие возмущений, она ослабляет и даже подавляет нарастание возмущений. Можно оценить на основании данных, представленных на рис. 2, скорость распространения возмущения. Она направлена в сторону, противоположную конвекции плазмы,

и приблизительно равна 100 м/с. Такое движение дуг относительно ионосферной плазмы с близкой по величине скоростью наблюдается экспериментально [6].

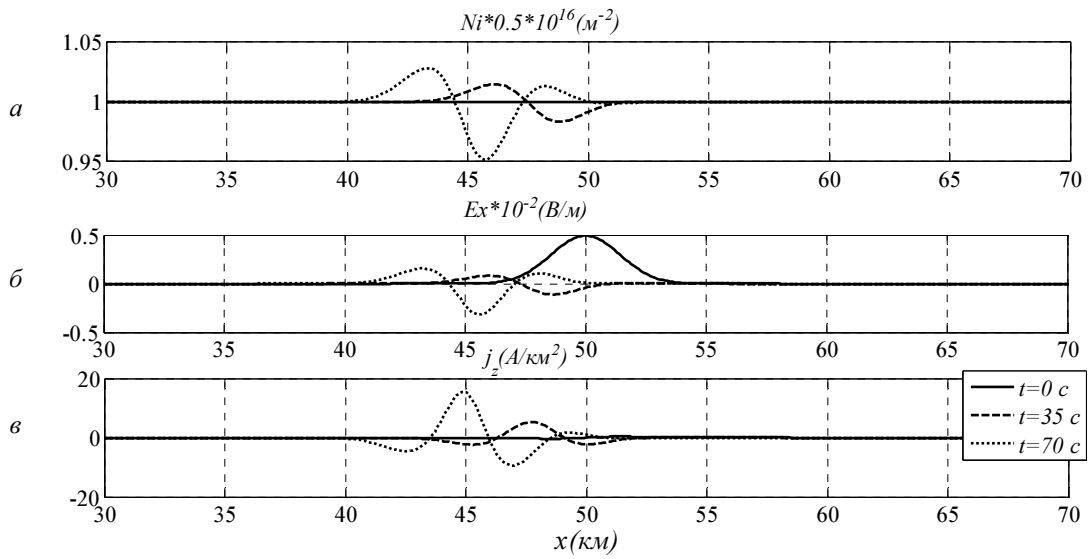


Рис. 2. Развитие ионосферных возмущений, инициированных импульсом электрического поля E_x в момент времени $t = 0$ длительностью $\tau = 4$ с

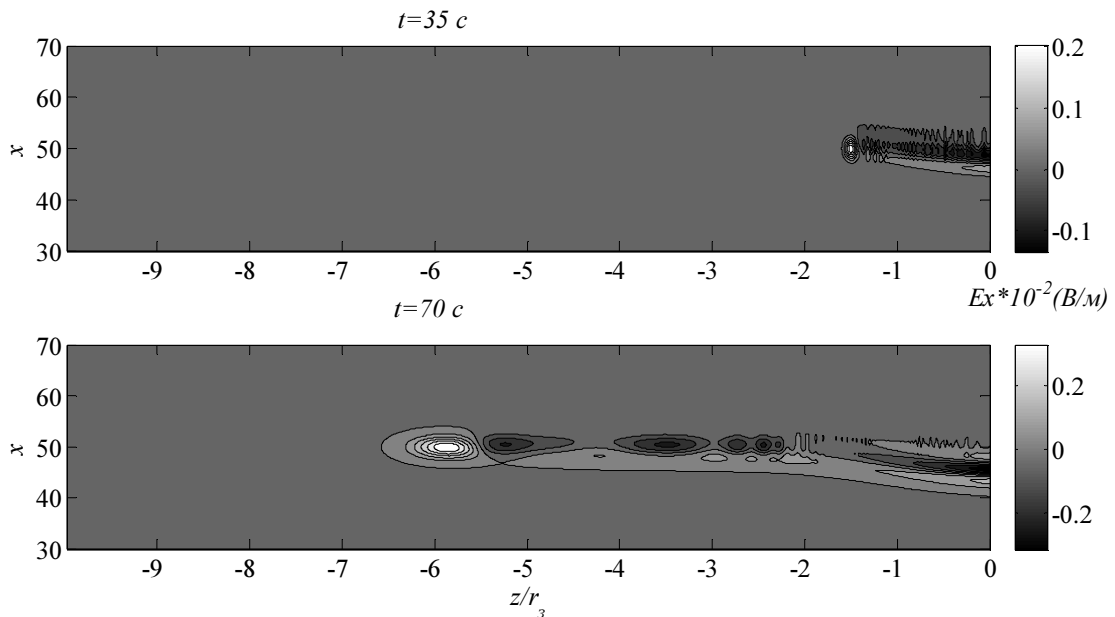


Рис. 3. Распространение возмущения E_x вдоль магнитного поля из ионосферы при $z = 0$ в магнитосферу

На рис. 3 приведены распределения компоненты E_x электрического поля в разные моменты времени. Величина напряженности электрического поля увеличивается в зависимости от времени и расстояния от ионосферы, достигая 3 мВ/м; в ионосфере поле значительно меньше. Поперечные мелкомасштабные структуры электрического поля часто наблюдаются в авроральной магнитосфере [7].

Выводы

Задача развития возмущений в движущейся ионосферной плазме рассмотрена с использованием методов численного моделирования. Расчеты выполнены в двумерном приближении для возмущений, имеющих масштаб поперек магнитного поля ~ 1 км в одном направлении и неограниченный масштаб в другом. В ионосфере процессы рассмотрены как нелинейные, в магнитосфере использовалось линейное приближение. Плазма в магнитосфере считалась холодной. Линейное уравнение распространения возмущений вдоль магнитного поля из ионосферы в магнитосферу решено с учетом изменения скорости вдоль магнитного поля.

Время нарастания возмущений с масштабом ~ 1 км составляет ~ 60 с (для возмущенной ионосферы проводимость Холла в расчетах равна 8 См) и зависит от проводимости ионосферы; с уменьшением проводимости возмущения развиваются быстрее. Возмущения на меньших масштабах также развиваются быстрее.

Учет теплового движения частиц в ионосфере приводит к ослаблению и даже подавлению развития ионосферных возмущений.

Значительные продольные токи (до 10 А/км^2) вызывают незначительные изменения концентрации ионосферной плазмы, что связано с недооценкой ионизационного члена в уравнениях.

Скорость движения возмущений поперек магнитного поля относительно скорости конвекции составляет $\sim 100 \text{ м/с}$.

Напряженность электрического поля возмущения растет с удалением от ионосферы и достигает максимума в магнитосфере вблизи экваториальной плоскости.

Библиографический список

1. Atkinson G. Auroral arcs: Result of the interaction of a dynamic magnetosphere with the ionosphere // J. Geophys. Res. 1970. V. 75. P. 4746.
2. Holzer T. E., Sato T. Quiet auroral arcs and electrodynamic coupling between the ionosphere and magnetosphere // J. Geophys. Res. 1973. V. 78. P. 7330.
3. Trakhtengerts V. Yu., Feldstein A. Ya. Turbulent Alfvén boundary layer in the polar ionosphere // J. Geophys. Res. 1991. V. 96. P. 19363–19374.
4. Lysak R. L., Yan Song. Energetics of the ionospheric feedback interaction // J. Geophys. Res. 2002. V. 107, N A8. P. 1160.
5. Волков М. А. Расчет потока электромагнитной энергии над дугой сияния // Вестник МГТУ. 2014. Т. 17, № 1. С. 199–203.
6. Williams P. J. S., del Pozo C. F., Hiscock I., Fallows R. Velocity of auroral arcs drifting equatorward from the polar cap // Ann. Geophysicae. 1998. V. 16. P. 1322–1331.
7. Mozer F. S., Cattell C. A., Hudson M. K., Lysak R. L., Temerin M., Torbert R. B. Satellite measurements and theories of low altitude auroral particle acceleration // Space Sci. Rev. 1980. V. 27. P. 155–313.

References

1. Atkinson G. Auroral arcs: Result of the interaction of a dynamic magnetosphere with the ionosphere // J. Geophys. Res. 1970. V. 75. P. 4746.
2. Holzer T. E., Sato T. Quiet auroral arcs and electrodynamic coupling between the ionosphere and magnetosphere // J. Geophys. Res. 1973. V. 78. P. 7330.
3. Trakhtengerts V. Yu., Feldstein A. Ya. Turbulent Alfvén boundary layer in the polar ionosphere // J. Geophys. Res. 1991. V. 96. P. 19363–19374.
4. Lysak R. L., Yan Song. Energetics of the ionospheric feedback interaction // J. Geophys. Res. 2002. V. 107, N A8. P. 1160.
5. Volkov M. A. Raschyot potoka elektromagnitnoi energii nad dugoi siyaniya [The calculation of the electromagnetic energy flow over the auroral arc] // Vestnik MGTU. 2014. V. 17, N 1. P. 199–203.
6. Williams P. J. S., del Pozo C. F., Hiscock I., Fallows R. Velocity of auroral arcs drifting equatorward from the polar cap // Ann. Geophysicae. 1998. V. 16. P. 1322–1331.
7. Mozer F. S., Cattell C. A., Hudson M. K., Lysak R. L., Temerin M., Torbert R. B. Satellite measurements and theories of low altitude auroral particle acceleration // Space Sci. Rev. 1980. V. 27. P. 155–313.

Сведения об авторе

Волков Михаил Анатольевич – Мурманский государственный технический университет, факультет арктических технологий, кафедра общей и прикладной физики, канд. физ.-мат. наук, доцент; e-mail: volkovma@mstu.edu.ru

Volkov M. A. – Murmansk State Technical University, Faculty of Arctic Technologies, Department of General and Applied Physics, Cand. of Phys.-Math. Sci., Associate Professor; e-mail: volkovma@mstu.edu.ru