Секция В. Физика атмосферы Земли, включая околоземное космическое пространство. БШФФ-2026. С. 288–289.

УДК 533.951.2
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-288
ORCID 0000-0003-2715-8855

РАСЧЕТ ВЕЛИЧИНЫ ПРОДОЛЬНОГО ТОКА, ОБУСЛОВЛЕННОГО АЛЬФВЕНОВСКОЙ ВОЛНОЙ

Д.В. Костарев, П.Н. Магер

Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия, kostarev@iszf.irk.ru

CALCULATION OF THE PARALLEL ELECTRIC CURRENT MAGNITUDE CAUSED BY THE ALFVÉN WAVE

D.V. Kostarev, P.N. Mager

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, kostarev@iszf.irk.ru

Аннотация. Рассмотрены продольные электрические токи, возникающие под действием альфвеновской волны в искривленном магнитном поле с запертыми частицами. Рассчитанный в рамках гирокинетики потенциал продольного электрического поля альфвеновской волны используется для определения величины продольного тока в районе ионосферы. Полученные результаты могут быть использованы для определения интенсивности продольных токов, связанных с альфвеновскими колебаниями.

Ключевые слова: магнитосфера, УНЧ-волны, продольные электрические токи, продольное электрическое поле, ускорение частиц.

Abstract. This paper examines parallel electric currents generated by an Alfvén wave in a curved magnetic field with trapped particles. The Alfvén wave parallel electric field potential, calculated within the gyrokinetic framework, determines the parallel electric current magnitude in the ionosphere. The results obtained can be used to determine the intensity of the parallel currents associated with Alfvén oscillations.

Keywords: magnetosphere, ULF waves, parallel electric currents, parallel electric field, particle acceleration.

ВВЕДЕНИЕ

Один из ключевых вопросов физики магнитосферы — это определение причин возникновения и интенсивности электрических токов, направленных вдоль линий геомагнитного поля Земли. Для возникновения тока необхёодима разность потенциалов, однако прямые измерения продольного электрического поля вдоль всей силовой линии в настоящее время не могут быть проведены из-за технических сложностей подобного эксперимента.

Одной из причин изменения разности потенциалов продольного электрического поля являются ультранизкочастотные (УНЧ) волны. Они постоянно наблюдаются в земной магнитосфере. Наиболее мощные колебания могут иметь амплитуды до десятков нанотесла и способны модулировать и ускорять захваченные в магнитосфере заряженные частицы [Sarris et al., 2007]. Это может проявляться как вариации светимости авроральных дуг [Yamomoto et al., 1988; Keiling et al., 2002; Hirahara et al., 2024] и пульсации риометрического поглощения [Olson et al., 1980; Белаховский и Пилипенко, 2010; Белаховский и др., 2016].

В работе [Knight, 1973] исследовалась задача определения продольного электрического потенциала по наблюдаемому току в ионосфере. В данной работе мы решили прямую задачу расчета величины продольного электрического тока для найденного в работе [Kostarev et al., 2021] потенциала продольного электрического поля вдоль силовой линии геомагнитного поля.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Для определения вклада УНЧ-волн в продольный ток на ионосфере мы использовали выражение для продольного тока из работы [Knight, 1973]:

$$j_{\parallel} = eB_I\left[n_I\sqrt{\frac{kT_I}{2\pi m}}\,g(\Delta,T_I) - n_S\sqrt{\frac{kT_S}{2\pi m}}\,exp\left(\frac{\Delta}{kT_S}\right)g(\Delta,T_S)\right] \quad (1)$$

где

$$g(\Delta,T) = \frac{1}{B_S}\left[exp\left(\frac{\Delta}{kT}\right) - \frac{B_I-B_S}{B_I}\,exp\left(-\frac{\Delta}{kT}\frac{B_I}{B_I-B_S}\right)\right] \quad (2)$$

и $\Delta = e(\phi_I - \phi_S)$, e — заряд электрона, m — масса электрона, k — постоянная Больцмана, T — температура, n — плотность, B – значение магнитного поля. Индексы I и S в нашем случае означают ионосферу и точку на силовой линии с минимумом потенциала соответственно.

Для оценки продольного тока мы приняли, что электронное давление внутри силовой трубки постоянное по всей ее длине до границы ионосферы, а электронная плотность меняется как $n \sim \frac{1}{r^3}$. Таким образом,

$$P = n_I kT_I = n_S kT_S = n_{eq} kT_{eq} \quad (3)$$

и

$$n = n_{eq} cos^{-6}\theta \quad (4)$$

где n_{eq} и T_{eq} — плотность и температура электронов, которые вносят вклад в давление, на

экваторе. Магнитное поле считали дипольным вдоль силовой линии:

$$B = B_0 \left(\frac{R_E}{L}\right)^3 \frac{\sqrt{1+3sin^2\theta}}{cos^{-6}\theta}. \quad (5)$$

Точку минимума продольного электрического потенциала на силовой линии и его значение, а также параметры плазмы на экваторе возьмем из работы [Kostarev et al., 2021], рис. 1. В этой работе рассмотрена гирокинетическая модель диполеподобной магнитосферы с захваченными заряженными частицами, а продольный электрический потенциал генерируется альфвеновской волной.

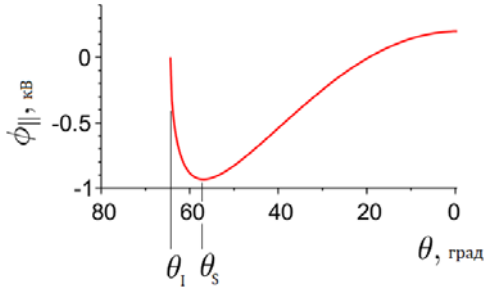

Рис. 1. Распределение продольного электрического потенциала от ионосферы до геомагнитного экватора вдоль геомагнитной силовой линии [Kostarev et al., 2021]. θ_I и θ_S — ионосфера и минимум потенциала соответственно

Общая схема системы координат показана на рис. 2; θ_I и θ_S — координаты на геомагнитной силовой линии границы ионосферы и минимума потенциала соответственно, θ_0 соответствует геомагнитному экватору, R_I — расстояние от центра земли до ионосферы, L — расстояние от центра земли до вершины силовой линии, R_E — радиус Земли.

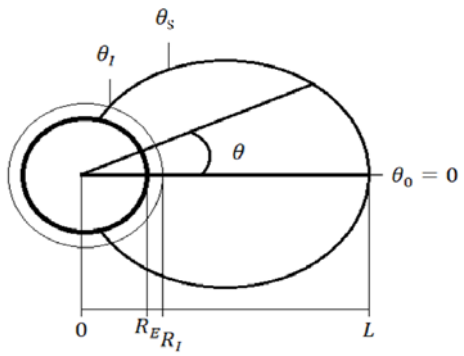

Рис. 2. Схема системы координат. Описание в тексте

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ

Для расчета мы приняли параметры, как в [Kostarev et al., 2021]: азимутальное электрическое поле волны $\vec{E}_a = 10^{-3}$ В/м, азимутальное волновое число $m = 50$, альфвеновская скорость $V_A = 1550$ км/с, радиус ионосферы $R_I = R_E + 1500$ км, расстояние до минимума потенциала $R_S = 1.96R_E$ $L = 6.6R_E$, собственная частота волны $\omega = 11.8$ мГц, средняя тепловая скорость и плотность электронов на геомагнитном экваторе $T_{eq} = 1$ кэВ и $n_{eq} = 3$ см$^{-3}$ соответственно. Величина продольного электрического потенциала в минимуме $\phi_S = -917$ В, на ионосфере $\phi_S = 0$.

Используя выражения (3), (4) и (5) находим значения B_I, B_S, n_I, n_S, T_I, T_S и подставляем их в выражение (1). В результате получается значение продольного электрического тока на ионосфере $j_{\parallel} = 6.5 \cdot 10^{-5} \frac{A}{м^2}$. Это значение хорошо согласуется с данными спутниковых наблюдений [Frank and Ackerson, 1971].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализмруя полученные результаты, можно сделать вывод, что УНЧ-волны могут вносить существенный вклад в величину продольных токов. Это может проявляться как вариации светимости участков полярных дуг с частотами УНЧ-волн, распространяющихся по магнитным оболочкам, проецирующимся на области сияний.

Результаты работы могут быть полезны при интерпретации спутниковых данных об УНЧ-волнах и наблюдениях высыпания частиц в полярных областях.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 24-77-10012.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Белаховский В.Б., Пилипенко В.А. Возбуждение Pc5-пульсаций геомагнитного поля и риометрического поглощения // Космич. исслед. Т. 48. № 4. С. 319–334. 2010.

Белаховский В.Б., Пилипенко В.А., Самсонов С.Н., Лоренцен Д. Особенности пульсаций Pc5-диапазона в геомагнитном поле, авроральной светимости и риометрическом поглощении // Геомагнетизм и аэрономия. 2016. Том 56, № 1, С. 46–63.

Frank L.A. and Ackerson K.L. Observations of charged particle precipitation into the auroral zone // J. Geophys. Res. 1971. V. 76. P. 3612–3643.

Hirahara M., Ebihara Y., Kitamura N., Sakanoi T., Asamura K., Takada T., Saito H. Reimei satellite observations of Alfvenic interaction modulating inverted-V electrons and filamentary auroral forms at the poleward edge of a discrete arc // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2024. V. 129. P. e2024JA032650. https://doi.org/10.1029/2024JA032650.

Keiling A., Wygant J.R., Cattell C., Peria W., Parks G., Temerin M., Mozer F.S., Russell C.T., Kletzing C.A. Correlation of Alfven wave Poynting flux in the plasma sheet at 4–7 R_E with ionospheric electron energy flux // J. Geophys. Res. 2002. V. 107. 1132. P. SMP 241.

Kostarev D.V., Mager P.N., Klimushkin D.Y. Alfvén wave parallel electric field in the dipole model of the magnetosphere: Gyrokinetic treatment // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2021, 126, e2020JA028611. https://doi.org/10.1029/2020JA028611.

Knight S. Parallel electric fields // Planetary and Space Sci. 1973. V. 21, iss. 5. P. 741–750. https://doi.org/10.1016/0032-0633(73)90093-7.

Olson J.V., Rostoker G., Olchowy G. A study of concurrent riometer and magnetometer variations in the Pc4–5 pulsation band // J. Geophys. Res. 1980. V. 85. P. 1695–1702.

Sarris T.E., Lotoaniu T.M., Li X., Singer H.J. Observations at geosynchronous orbit of a persistent Pc5 geomagnetic pulsation and energetic electron flux modulations // Ann. Geophysicae. 2007. V. 25. P. 1653–1667.

Yamamoto T., Hayashi K., Kokubun S., Oguti T., Ogawa T. Auroral activities and long-period geomagnetic pulsations: Pc5 pulsations and concurrent auroras in the dawn sector // J. Geomagnetism and Geoelectricity. 1988. V. 40. P. 553–569.