

ГЕНЕРАЦИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ИОННО-ЦИКЛОТРОННЫХ ВОЛН НЕОДНОРОДНЫМИ ЛОКАЛИЗОВАННЫМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ПОЛЯМИ И ГРАДИЕНТАМИ КОНЦЕНТРАЦИИ ПЛАЗМЫ В ВЫСОКОШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЕ

А.А. Чернышов(1), А.А. Ильясов(1), М.М. Могилевский(1),
И.В. Головчанская(2), Б.В. Козелов(2)

(1)Институт космических исследований Российской академии наук
(2)Полярный геофизический институт Российской академии наук
E-mail: achernyshov@iki.rssi.ru

Аннотация. Высокоширотная ионосфера является неоднородной средой, где существуют неоднородности плотности плазмы, градиенты концентрации на границах авроральной области и полярной шапки, а каверны плотности часто сопровождают развитие широкополосной турбулентности. Наблюдаемую электростатическую широкополосную турбулентность можно объяснить с помощью теории электростатических ионно-циклотронных волн. В этом случае поток ионов вдоль магнитного поля, имеющий градиент потоковой скорости поперек магнитного поля, изменяет существенным образом дисперсионные свойства неустойчивости. В рамках этой теории предполагается, что источником возмущений является неустойчивость, к которой приводит неоднородное распределение плотности энергии, связанное со сдвигом скорости в плоскости, перпендикулярной магнитному полю. Учет неоднородностей плазменной концентрации может привести к изменению порога возбуждения неустойчивости и, следовательно, изменению инкремента неустойчивости. В связи с этим, для изучения неустойчивостей, к которым приводят неоднородное распределение плотности плазмы и электрического поля в высокоширотной ионосфере, разработаны вычислительные алгоритмы и проведено численное моделирование при различных параметрах плазмы. Показано, что учет неоднородностей плотности плазмы приводит к изменению порога возбуждения неустойчивости, и они могут являться источниками генерации электростатических ионно-циклотронных волн в высокоширотной ионосфере Земли.

1. Введение

В последнее время часто сообщается о наблюдениях широкополосных низкочастотных возмущений (broadband ELF turbulence) в магнитосферно-ионосферной системе высоких широт, которые регистрируются при различных условиях в околоземной плазме. Согласно наблюдениям, широкополосный электростатический шум генерируется в верхней ионосфере и в ближней магнитосфере только в областях неоднородностей, что делает невозможным его описание в рамках теории [1], развитой для однородной бесконечной плазмы. Из известных в настоящее время теорий наиболее подходящей для интерпретации широкополосного электростатического шума в авроральной зоне является теория электростатических ионно-циклотронных волн, возбуждаемых локализованными электрическими полями, которые, как и продольные токи, присутствуют в авроральной ионосфере и достигают больших значений в событиях альфвеновской турбулентности, а также комбинацией продольных токов и локализованных электрических полей. Впервые в работе [2] предложена теория возбуждения электростатических ионно-циклотронных волн локализованными поперечными электрическими полями в отсутствие продольных токов вдоль магнитного поля. Позже теория была обобщена и включила как локализованные электрические поля, так и продольные потоки электронов и ионов, неоднородные в поперечном направлении [3]. В рамках этой теории предполагается, что возмущение вызывается неустойчивостью (inhomogeneous energy-density-driven instability (IEDDI)), к которой приводит неоднородное распределение плотности энергии, связанное со сдвигом скорости в плоскости, перпендикулярной магнитному полю. Следует заметить, что в этом случае свободная энергия, необходимая для раскачки неустойчивости, заключена в поперечном сдвиге скорости. Однако, несмотря на то, что данная теория активно развивается в последнее время, основное внимание главным образом уделяется неоднородным локализованным электрическим полям. Проведены подробные теоретические и численные исследования при различных условиях, в которых может находиться плазма. Но до сих пор не была рассмотрена возможность генерации IEDDI неустойчивости неоднородностями концентрации плазмы (отдельно или совместно с неоднородными электрическими

полями). Это особенно важно в задачах космической физики. Известно, что авроральная ионосфера и магнитосфера Земли являются неоднородными средами, где существуют неоднородности плотности плазмы, градиенты концентрации на границах авроральной области и полярной шапки, а каверны плотности часто сопровождают развитие широкополосной турбулентности. Учет неоднородностей плазменной концентрации может привести к изменению порога возбуждения неустойчивости и, следовательно, изменению инкремента неустойчивости. Изучению этого вопроса и посвящена представленная работа.

2. Основные уравнения

Рассмотрим возмущения магнитоактивной неоднородной плазмы. Однородное внешнее магнитное поле B_0 (в приложении к задачам, связанным с авроральной областью, этим полем является магнитное поле Земли) ориентировано вдоль оси z . Перпендикулярно магнитному полю, вдоль оси x , локализовано квазистатическое неоднородное электрическое поле. Совместно электромагнитные поля создают дрейф частиц, направленный вдоль оси y , со скоростью $V_E(x)$, а продольный ток V_d направлен вдоль магнитного поля B_0 . Если ввести в однородное продольное электрическое поле E_0 вдоль оси x , то появится дрейф V_E в направлении оси y . В этом случае, в дисперсионном соотношении вместо частоты в лабораторной системе отсчета будет частота в собственной системе отсчета $\omega_1 = \omega - k_y V_E$ в результате эффекта, связанного с доплеровским сдвигом. Это приводит к тому, что плотность энергии в волне при достаточно больших $k_y V_E$ может быть отрицательной. Возникает неоднородность в поле плотности энергии, и энергия может переходить из области с отрицательным значением плотности энергии в область, где плотность энергии положительна. Этот поток энергии может возбудить IEDD неустойчивость, так как он не устраняет неоднородность плотности энергии. Это приводит к нелокальному дисперсионному уравнению

$$\frac{d^2\psi}{d\xi^2} + \kappa^2(\xi)\psi = 0 \quad (1)$$

Здесь $\xi = \frac{x}{\rho_i}$ — отношение координаты к гирорадиусу ионов, а

$$\kappa^2(\xi) = -2 \frac{1 + \sum \Gamma(b) A_{ni}(\xi) + \tau(1 + A_{0e})}{\sum \Gamma'(b) A_{ni}(\xi)} \quad (2)$$

$$A_{n\alpha} = \frac{\omega_1 + \omega_{2\alpha} - \omega_\alpha^*}{k_z v_{i\alpha}} Z \left(\frac{\omega_1 - \omega_{2\alpha} - n\Omega_\alpha}{k_z v_{i\alpha}} \right) \quad (3)$$

В выражениях (1) – (3) использованы следующие обозначения: $\tau = \frac{T_i}{T_e}$ — отношение температуры ионов к температуре электронов, $v_{i\alpha}$ - тепловая скорость частиц сорта α , Ω_α — гирочастота частиц сорта α , $\omega_1 = \omega - k_y V_E - k_z V_d$, $\omega_{2\alpha} = \frac{k_y V_E \rho_\alpha^2}{2}$, $\omega_\alpha^* = k_y \Omega_\alpha \rho_\alpha \varepsilon_n$, $\varepsilon_n = (\rho_\alpha n_0(\xi)) / (\frac{dn_0(i)}{d\xi})$, Z — плазменная дисперсионная функция, $\Gamma_n = \frac{d\Gamma_n}{db}$, $b = \frac{(k_y \rho_i)^2}{2}$, $\Omega_i = \frac{eB_0}{m_i v_{ii}}$ — гирочастота ионов, v_{ii} — тепловая скорость ионов, ρ_i — гирорадиус ионов, $\Gamma_n(b) = \exp(-b) I_n$, I_n — модифицированные функции Бесселя. Поиск неустойчивостей сводится к задаче на поиск собственных значений. Необходимо найти $\omega = \omega_r + i\gamma$, при которых существует решение дисперсионного уравнения, и γ больше нуля.

3. Численное моделирование и анализ результатов

В работе уравнение (1) решается численно, методом стрельбы. В работе рассматривается многослойная задача, значения напряженности электрического поля и концентрации плазмы использованы наблюдательные данные со спутника Freja. Получены зависимости инкремента волны γ от параметра b как при одновременном учете неоднородностей электрического поля и концентрации плазмы, так и для каждого по отдельности при различных параметрах среды.

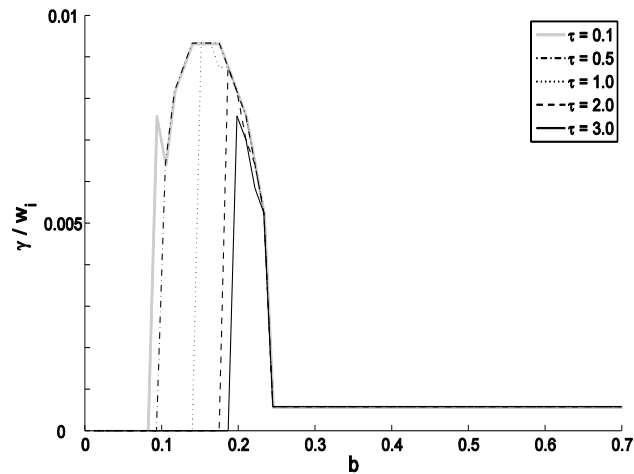


Рис.1. Инкремент IEDDI неустойчивости в присутствии только неоднородного электрического поля, нормированный на гирочастоту иона в зависимости от параметра b .

Получены зависимости инкремента волны γ от параметра b как при одновременном учете неоднородностей электрического поля Рис.1 и концентрации плазмы Рис.2, так и для каждого по отдельности при различных параметрах среды. Для каждого из случаев получены численные результаты при вариации величин $\tau = T_i / T_e$ - отношение температуры ионов к температуре электронов, действительная часть частоты волны задавалась как $\omega_r = 0.98\Omega_i$, гирорадиус ионов $\rho = 10$ метров, а величина продольного тока $V_d = 0.1v_{te}$. Показано, что не только локализованные неоднородные электрические поля способны возбуждать электростатические ионно-циклотронные волны, но и неоднородности концентрации плазмы также могут являться источником таких возмущений, которые приводят к IEDDI неустойчивости вследствие неоднородного распределения плотности энергии из-за сдвига скорости в плоскости, перпендикулярной внешнему магнитному полю. Когда одновременно учитываются неоднородности электрических полей и плотности плазмы, то происходит уширения области решения. Таким образом, показано, что сопровождающий альфвеновскую

турбулентность электростатический широкополосный шум в авроральной области может быть идентифицирован как разновидность электростатических ионно-циклотронных волн, возбуждаемых IEDDI неустойчивостью вследствие неоднородного распределения плотности энергии. Для развития такого рода неустойчивости необходимы локализованные неоднородные электрические поля и/или неоднородности концентрации плазмы. Впервые продемонстрировано, что неоднородности плотности плазмы могут возбуждать IEDDI неустойчивость даже в отсутствии неоднородных электрических полей.

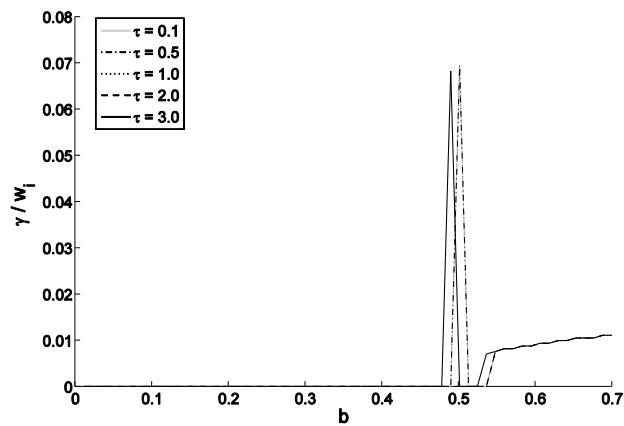


Рис.2. Инкремент IEDDI неустойчивости в присутствии только неоднородностей концентрации плазмы, нормированный на гирочастоту иона в зависимости от b .

Работа поддержана программой П-22 Президиума РАН, грантами МК-267.2014.5 и РФФИ 13-05-90436, 14-02-31848.

Литература

1. J.M.Kindel, C.F.Kennel// J.Geophys.Res.,1971, v.76, p.3055
2. G.Ganguli, Y.Lee, P.Palmadesso//Phys.Fluids,1985, v.28, p.761
3. V.Gavrishchaka, M.Koepke, G.Ganguli//Phys.Plasmas,1996, v.3, p.3091