

ДРЕЙФОВО-КОМПРЕССИОННЫЕ ВОЛНЫ, РАСПРОСТРАНЯЮЩИЕСЯ В НАПРАВЛЕНИИ ДРЕЙФА ЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В МАГНИТОСФЕРЕ

Д.В. Костарев, П.Н. Магер

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия
kostarev@iszf.irk.ru

DRIFT-COMPRESSSION WAVES PROPAGATING IN THE DRIFT DIRECTION OF ENERGETIC ELECTRONS IN THE MAGNETOSPHERE

D.V. Kostarev, P.N. Mager

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia

Аннотация. В рамках гирокинетики показана возможность существования дрейфово-компрессионных волн в магнитосфере, распространяющихся в направлении дрейфа энергичных электронов. Предполагается, что плазма состоит в основном из холодных частиц с примесью горячих частиц: протонов с распределением Максвелла по энергиям и электронов с инверсным распределением по энергиям. Найдены условия существования этих волн и их усиления за счет резонансного взаимодействия с энергичными электронами с инверсным распределением (дрейфовая неустойчивость). Результаты работы могут быть полезны при интерпретации наблюдений волновых явлений в магнитосфере с частотами в диапазоне геомагнитных пульсаций Pc5 и ниже.

Ключевые слова: магнитосфера, УНЧ волны, взаимодействие волна–частица.

Abstract. In the paper in the gyrokinetic framework it was shown that in the magnetosphere the drift-compression waves can be propagating in the drift direction of energetic electrons. The plasma is assumed to be composed of core cold particles and a hot admixture of protons with a Maxwell distribution and electrons with an inverted distribution. The conditions of existence of such waves and their amplification due to resonance interaction with energetic electrons (drift instability) have been found. The obtained results can be useful for interpretation of wave observations in the magnetosphere with frequencies in the range of geomagnetic pulsations Pc5 and below.

Keywords: magnetosphere, ULF waves, wave–particle interaction.

Введение

В магнитосферной плазме наблюдается широкий спектр ультра-низкочастотных (УНЧ) колебаний, называемых также геомагнитными пульсациями. В общем случае они могут быть возбуждены либо как собственные альфвеновские колебания на резонансной L-оболочке, где частота БМЗ волны, рожденной внешними источниками, совпадает с локальной собственной частотой альфвеновского резонанса [Chen, Hasegawa, 1974; Southwood, 1974], либо на локальных (внутренних) неустойчивостях плазмы. Первые имеют малые значения азимутального волнового числа ($m \lesssim 0(10)$) и могут наблюдаться наземными установками, в то время как вторые обычно имеют большие значения m ($m \sim 0(10^2)$) и из-за экранировки ионосферой, могут наблюдаться средствами искусственных спутников земли или радарных установок.

Среди волн с большими m в диапазоне Pc5 можно выделить группу «буревых компрессионных колебаний», частоты которых могут быть существенно ниже основной частоты альфвеновского резонанса на данной L-оболочке. Эту группу можно наблюдать как при анализе спутниковых данных [Barfield, McPherron, 1972], так и в радарных исследованиях [Allan et al., 1982]. По поводу физической

природы этих колебаний пока нет единого мнения, однако на наш взгляд, наиболее вероятным кандидатом для интерпретации большинства из них являются дрейфово-компрессионные моды. Для их существования достаточно только конечного давления плазмы и ее неоднородности поперек магнитных оболочек. При этом неустойчивость может возникнуть из-за пространственных градиентов концентрации горячей плазмы [Crabtree et al., 2003; Klimushkin, Mager, 2011], инверсности распределения горячих протонов по энергиям [Mager et al., 2013] или сцепления с альфвеновской модой вследствие кривизны линий магнитного поля [Klimushkin et al., 2012]. Характерной особенностью дрейфово-компрессионных волн является зависимость их частоты от азимутального волнового числа. Подобное поведение было обнаружено в экспериментальных данных радарных исследований [Mager et al., 2015; Chelpanov et al., 2016].

Ранее было показано, что дрейфово-компрессионные моды, распространяющиеся в направлении дрейфа высокоэнергичных протонов, резонансно взаимодействуют с ними. [Mager et al., 2013]. Однако, как показано в работе [James et al., 2013], в некоторых случаях наблюдались волны, распространяющиеся и в обратном направлении, т. е. в направлении дрейфа электронов. Поэтому, мы

рассмотрели ситуацию, когда волна распространяется в одном направлении с дрейфом электронов, предполагая, что в плазме присутствуют горячие протоны и электроны, причем последние имеют инверсное распределение.

Модель среды и основные уравнения

Мы использовали аксиально-симметричную модель магнитосферы, которая учитывает кривизну силовых линий и неоднородность фоновой плазмы поперек магнитных оболочек и вдоль силовых линий. Будем рассматривать плазму с примесью горячих протонов и электронов. Так как вклад холодных частиц в общее давление плазмы невелик, будем учитывать вклад только горячих частиц. При этом будем полагать, что протоны имеют распределение Максвелла по энергиям, а горячие электроны имеют инверсное распределение и моделируются следующей функцией:

$$F_e = \frac{n_e}{4\sqrt{2\pi}\Gamma(S+3/2)(\varepsilon_{0_e})^{S+3/2}} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{0_e}}\right)^S \exp\left(-\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{0_e}}\right). \quad (1)$$

Здесь n_p и n_e — концентрации протонов и электронов, соответственно, $\varepsilon=v^2/2$ — нормированная на массу энергия частиц, v — скорость частиц, S — положительное целое число, $\Gamma(\dots)$ — гамма-функция, ε_{0_p} и ε_{0_e} — параметры пропорциональные квадрату тепловой скорости частиц. Здесь и далее индексы p и e обозначают принадлежность переменной к протонам или электронам соответственно. Отметим, что при $S=0$ функция распределения для электронов (1) становится распределением Максвелла. Для $S>0$ электроны имеют среднюю энергию частиц $\bar{\varepsilon}_e = (S+3/2)\varepsilon_{0_e}$ и энергию в максимуме $\varepsilon_{e_{\max}} = S\varepsilon_{0_e}$.

Колебания плазмы с частотой меньше gyro-частоты частиц плазмы могут быть рассмотрены в рамках gyroкинетики в ВКБ приближении [Chen, Hasegawa, 1991]. В приближении, когда частота волны много меньше баунс-частоты частиц, из уравнений gyroкинетики, представленных в работе [Chen, Hasegawa, 1991], можно получить уравнение, описывающее дрейфово-компрессионную моду. Однако, в отличие от предыдущих работ [Crabtree et al., 2003, Klimushkin, Mager, 2011; Mager et al., 2013], где рассматривалась волна, направление распространения которой совпадало с направлением движения протонов ($k_2<0$), мы рассмотрим случай, когда волна распространяется в направлении дрейфа электронов ($k_2<0$). Таким образом, в уравнении для дрейфово-компрессионной моды знак в резонансном знаменателе члена, описывающего вклад горячих протонов, изменится на положительный, т. е. для протонов резонанса волна-частица не будет, но он будет для электронов, т.к. знак в их резонансном знаменателе станет отрицательным.

Мы выполнили ряд преобразований, как в [Mager et al., 2013], и получили однородное интегральное уравнение Фредгольма 2-го рода с симметричным ядром. Это уравнение можно решить чис-

ленно. При этом получатся наборы собственных функций b_N и собственных значений Λ_N интегрального уравнения, которые определяют продольную структуру и собственные частоты дрейфово-компрессионных мод. Как показано в [Mager et al., 2013], дрейфово-компрессионные моды локализованы вблизи геомагнитного экватора. Это соответствует экспериментальным данным спутниковых исследований компрессионных пульсаций Pc5 [Higuchi, Kokubun, 1988].

Результаты численных расчетов

Нами были построены (рис. 1, 2.) точные решения дисперсионного соотношения при различных параметрах градиентов плазмы и ее инверсности для случая $\beta_e/\beta_p=0.1$.

Волна может существовать при значениях ω_N , когда $R_e f(\omega_N)>0$ и $I_m f(\omega_N)=0$, так как $L_{b_p} \Lambda_N / \beta_p$ положительная и действительная величина. На графиках положительным значениям $R_e f(\omega)$ соответствует красный цвет, отрицательным, при которых нет решений — синий. Изолинии в красной области соответствуют значениям $R_e f(\omega)=L_{b_p} \Lambda_N / \beta_p$, где L_{b_p} — длина пути частицы за баунс-период, Λ_N — собственное значение интегрального уравнения [Mager et al., 2013]. Жирная линия соответствует $I_m f(\omega)=0$. Таким образом, решениям дисперсионного соотношения соответствуют точки на пересечении изолиний $R_e f(\omega)$ в красной области и линии $I_m f(\omega)=0$.

Значения параметров в параболическом приближении для магнитного поля на рис. 1, а: $\varepsilon'_{0_p} / \varepsilon_{0_p} = 0$; $n'_p/n_p=0$; $\varepsilon'_{0_e} / \varepsilon_{0_e} = 0$; $n'_e/n_e=0$; $S=0$; и на рис. 1, б: $\varepsilon'_{0_p} / \varepsilon_{0_p} = 0$; $n'_p/n_p=0$; $\varepsilon'_{0_e} / \varepsilon_{0_e} = 0$; $n'_e/n_e=0$; $S=1$. Шаг изменения значений $L_{b_p} \Lambda_N / \beta_p$ указан справа от каждого графика.

На рис. 1, а. видно, что жирная линия $I_m f(\omega)=0$ пересекает изолинии $L_{b_p} \Lambda_N / \beta_p$ в области, где $I_m(\omega/\Omega_{d_e})<0$. Из этого можно сделать вывод, что в отсутствии градиентов и инверсности распределения электронов по энергиям неустойчивость существовать не может. Если же, добавить инверсность распределения (рис.1б.), то получим ситуацию, при которой $I_m f(\omega)=0$ пересекает изолинии $L_{b_p} \Lambda_N / \beta_p$ в области, где $I_m(\omega/\Omega_{d_e})>0$ и $R_e f(\omega_N)>0$. То есть, выполняются все условия, при которых может существовать неустойчивость плазмы.

Для графиков на рис. 2. мы использовали параметры: рис. 2, а: $\varepsilon'_{0_p} / \varepsilon_{0_p} = 0.3L^{-1}$; $n'_p/n_p=0.3L^{-1}$; $\varepsilon'_{0_e} / \varepsilon_{0_e} = 1/5L^{-1}$; $n'_e/n_e=-1.5L^{-1}$; $S=0$; $n'_e/n_e=0$; $S=1$ и рис. 2, б: $\varepsilon'_{0_p} / \varepsilon_{0_p} = 0.3L^{-1}$; $n'_p/n_p=0.3L^{-1}$; $\varepsilon'_{0_e} / \varepsilon_{0_e} = 1/5L^{-1}$; $n'_e/n_e=-1.5L^{-1}$; $S=1$.

На графике рис. 2, а. видно, что неустойчивость может существовать при распределении Максвелла электронов по энергиям, но при наличии градиентов температуры и концентрации частиц. На рис. 2, б. показано, что инверсность распределения усиливает неустойчивость. Из приведенных рисун-

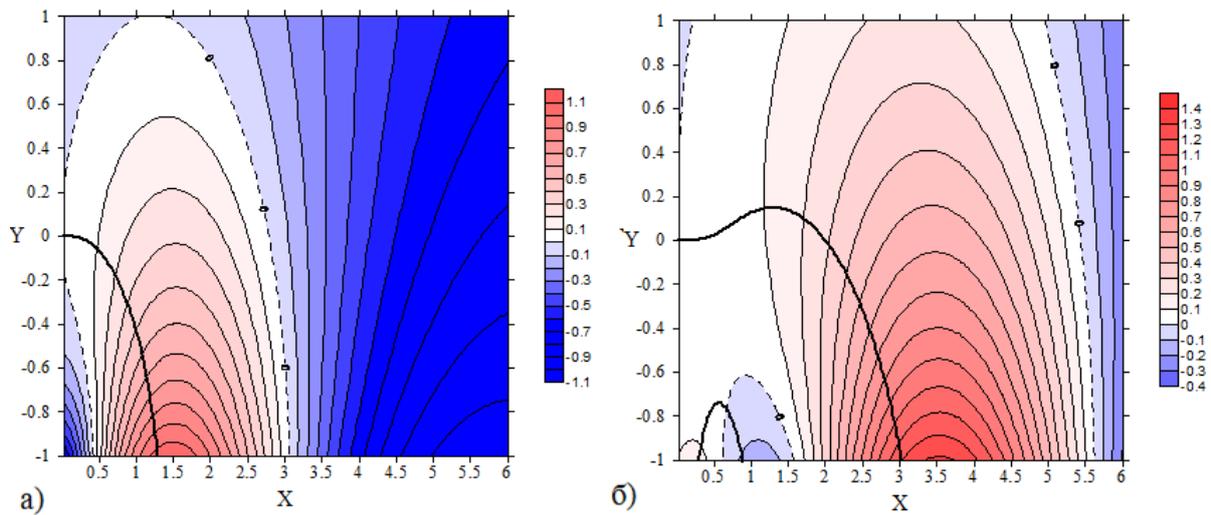


Рис. 1. Примеры решений дисперсионного соотношения (28) при различных параметрах плазмы. Здесь $X=R_c(\omega/\Omega_{de})$, $Y=I_m(\omega\Omega_{de})=0$, изолинии в красной области соответствуют значениям $L_{b_p}\Lambda_N/\beta_p$, точки их пересечения с жирной линией соответствуют решениям ω_N/Ω_{de} . Описание параметров плазмы смотрите в тексте

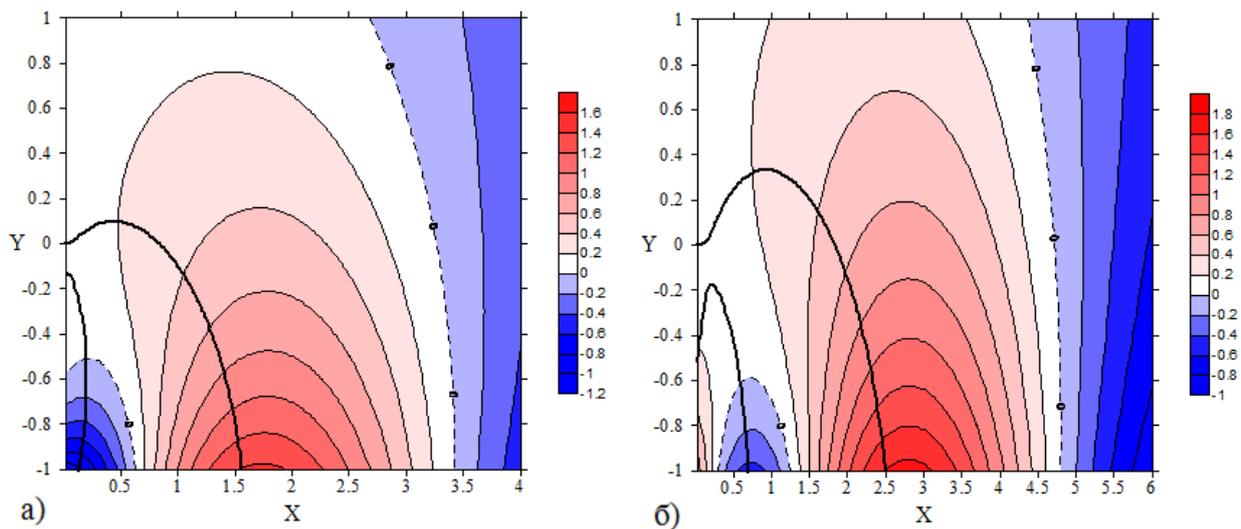


Рис. 2. То же, что и рис. 1

ков видно, что неустойчивость имеет максимальный инкремент, когда собственная частота дрейфово-компрессионной моды близка к дрейфовой частоте электронов.

Заключение

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что дрейфово-компрессионные волны могут распространяться в направлении дрейфа электронов (на восток). Эти волны могут существовать и в отсутствие градиентов температуры и концентрации плазмы. В этом случае фазовая скорость волны должна быть меньше средней скорости магнитного дрейфа частиц в пучке. При своем распространении эти волны могут раскачиваться из-за резонансного взаимодействия с электронами, т.е. за счет дрейфовой неустойчивости. Развитие такой неустойчивости возможно при определенных градиентах температуры и концентрации электронов и протонов или из-за инверсности распределения электронов по энергиям.

Результаты работы могут быть полезны при интерпретации наблюдений волновых явлений с частотами в диапазоне геомагнитных пульсаций Pc5 и ниже.

Список литературы

- Allan W., Poulter E.M., Nielsen E. STARE observations of a Pc5 pulsation with large azimuthal wave number // J. Geophys. Res. 1982. V. 87. P. 6163–6172. DOI: 10.1029/JA087iA08p06163.
- Barfield J.N., McPherron R.L. Statistical characteristics of storm-associated Pc5 micropulsations observed at the synchronous equatorial orbit // J. Geophys. Res. 1972. V. 77. P. 4720–4733. DOI: 10.1029/JA077i025p04720.
- Chelpanov M.A., Mager P.N., Klimushkin D.Y., et al. Experimental evidence of drift compressional waves in the magnetosphere: An Ekaterinburg coherent decameter radar case study // J. Geophys. Res. Space Phys. 2016. V. 121. P. 1315–1326. DOI: 10.1002/2015JA022155.
- Chen L., Hasegawa A. A theory of long period magnetic pulsation. 1. Steady state excitation of a field line resonance // J. Geophys. Res. 1974. V. 79. P. 1024–1032. DOI: 10.1029/JA079i007p01024.

Chen L., Hasegawa A. Kinetic theory of geomagnetic pulsations. 1. Internal excitations by energetic particles // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96. P. 1503–1512. DOI: 10.1029/90JA02346.

Crabtree C., Horton W., Wong H.V., van Dam J.W. Bounce-averaged stability of compressional modes in geotail flux tubes // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. P. 1084. DOI: 10.1029/2002JA009555.

Higuchi T., Kokubun S. Waveform and polarization of compressional Pc 5 waves at geosynchronous orbit // *J. Geophys. Res.* 1988. V. 93. P. 14,433–14,443. DOI: 10.1029/JA093iA12p14433.

James M.K., Yeoman T.K., Mager P.N., Klimushkin D.Y. The spatio-temporal characteristics of ULF waves driven by substorm injected particles // *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2013. V. 118. P. 1737–1749. DOI: 10.1002/jgra.50131.

Klimushkin D. Y., Mager P. N. Spatial structure and stability of coupled Alfvén and drift compressional modes in non-uniform magnetosphere: Gyrokinetic treatment // *Planet. Space Sci.* 2011. V. 59. P. 1613–1620. DOI: 10.1016/j.pss.2011.07.010.

Klimushkin D.Y., Mager P.N., Pilipenko V.A. On the ballooning instability of the coupled Alfvén and drift compressional modes // *Earth, Planets, Space* 2012. V. 64. P. 777–781. DOI: 10.5047/eps.2012.04.002.

Mager P.N., Bergardt O.I., Klimushkin D.Y., et al. First results of the high-resolution multibeam ULF wave experiment at the Ekaterinburg SuperDARN radar: Ionospheric signatures of coupled poloidal Alfvén and drift-compressional modes // *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 2015. V. 130–131. P. 112–126. DOI: 10.1016/j.jastp.2015.05.017.

Mager P.N., Klimushkin D.Y., Kostarev D.V. Drift-compressional modes generated by inverted plasma distributions in the magnetosphere // *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2013, V. 118. P. 4915–4923. DOI: 10.1002/jgra.50471.

Southwood D.J. Some features of field line resonances in the magnetosphere // *Planet. Space Sci.* 1974. V. 22. P. 483–491. DOI: 10.1016/0032-0633(74)90078-6.