

УЧЕТ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН В СРЕДНЕШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЕ

О.М. Бархатова^{1,2}, Н.В. Косолапова², Н.А. Бархатов², Ю.А. Главацкий²

¹ФГБОУ ВПО "Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет"

²ФГБОУ ВПО "Нижегородский государственный педагогический университет им. К. Минина"

Аннотация. Получены дисперсионные соотношения высокочастотной (ВЧ) и низкочастотной (НЧ) мод магнитогравиационных волн (МГВ) для приэкваториальной ионосферы при условии конечной проводимости и учете совместного влияния магнитного поля и силы тяжести. Определены характерные скорости распространения мод МГВ: для ВЧ моды они лежат в интервале 4700 – 550 м/с, для НЧ моды – в интервале 470–130 м/с. Для обеих мод скорости уменьшаются при приближении направления распространения к направлению геомагнитного поля. Также для всех направлений скорости снижаются с уменьшением длины волны. Таким образом, аналитически подтверждена возможность существования МГВ в приэкваториальной области ионосферы и их распространения со скоростями, заметно превышающими скорости акустико-гравитационных волн.

Введение

Изучение ионосферно-магнитосферных электромагнитных и плазменных возмущений, обусловленных гелиогеофизической активностью, является важным элементом диагностики околоземного пространства. Значительная часть волновых возмущений ионосферы обусловлена гравитационными волнами (ГВ), вызывающими изменения электронной концентрации ее слоев и регистрируемых как перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ) [Hocke et al., 1996]. Отмечено [Сорокин и Федорович, 1982; Бархатова и др., 2009; Бархатов и др., 2012], что при прохождении волн магнитогравиационного типа возмущения концентрации ионосферных слоев сопровождаются возмущениями геомагнитного поля. В ряде работ на основе экспериментальных данных подтверждается наличие связи между колебаниями концентрации ионосферных слоев и вариациями геомагнитного поля в периоды высокоэнергичных геофизических событий. В исследовании [Vorontsova et al., 2016] обнаружена модуляция ПЭС слоя F2 ионосферы геомагнитными пульсациями Pc 5 во время фазы восстановления сильной геомагнитной бури. Результаты [Бархатова и Косолапова, 2015] также свидетельствуют о наличии одновременных ионосферных и геомагнитных возмущений в периоды развития сильных землетрясений. В ряде работ, посвященных исследованию параметров ПИВ в ионосфере, зарегистрированы крупномасштабные неоднородности, скорости распространения которых заметно превышают известные скорости АГВ. Подобные случаи были отмечены в работах [Сергеенко и др., 2006, Liu et al., 2011] в периоды развития землетрясений. Возможно, здесь имело место распространение быстрых МГВ, поскольку для распространения АГВ больших пространственных масштабов со скоростями свыше 1300 м/с, температура ионосферы является недостаточно высокой [Сорокин и Федорович, 1982]. Отмечаемая в работах тесная связь ионосферных и геомагнитных волновых возмущений требует при их анализе учета магнитного поля, что приводит к повышению скоростей переноса возмущений [Бархатов и др., 2012].

В данной работе получены и проанализированы дисперсионные соотношения для высокочастотной и низкочастотной ветвей МГВ в условиях приэкваториальной атмосферы, а также определены их характерные скорости переноса. На основе анализа резонансных кривых, сделан вывод о направлениях распространения волн с наименьшим затуханием.

Дисперсионные соотношения для МГВ в приэкваториальной области атмосферы

Анализ линеаризованной системы магнитогидродинамических уравнений в присутствии гравитации позволил получить дисперсионные выражения для ВЧ и НЧ мод распространяющихся МГВ в безразмерных переменных частоты W и волнового вектора K .

$$W = \omega \cdot \frac{V_s^2 (4\pi\rho_0)^{1/2}}{H_0 g}, \quad K = k \cdot \frac{V_s^3 (4\pi\rho_0)^{1/2}}{H_0 g}$$

На рис. 1 представлены дисперсионные кривые этих мод, вычисленные для азимутального угла $\varphi = 0^\circ$ при следующих параметрах среднеширотной ионосферы: $T = 685$ К, $\gamma = 1.4$ – показатель адиабаты, $\beta = 6.35 \cdot 10^{-3}$ – отношение газокинетического давления к магнитному, $H = 2 \cdot 10^6$ см – высота однородной атмосферы,

$H_0 = 0.5$ Гс – величина невозмущенного геомагнитного поля, $\sigma = 10^5$ с⁻¹ – проводимость ионосферного слоя, $Re_m = 5.6 \cdot 10^{-10}$ – магнитное число Рейнольдса.

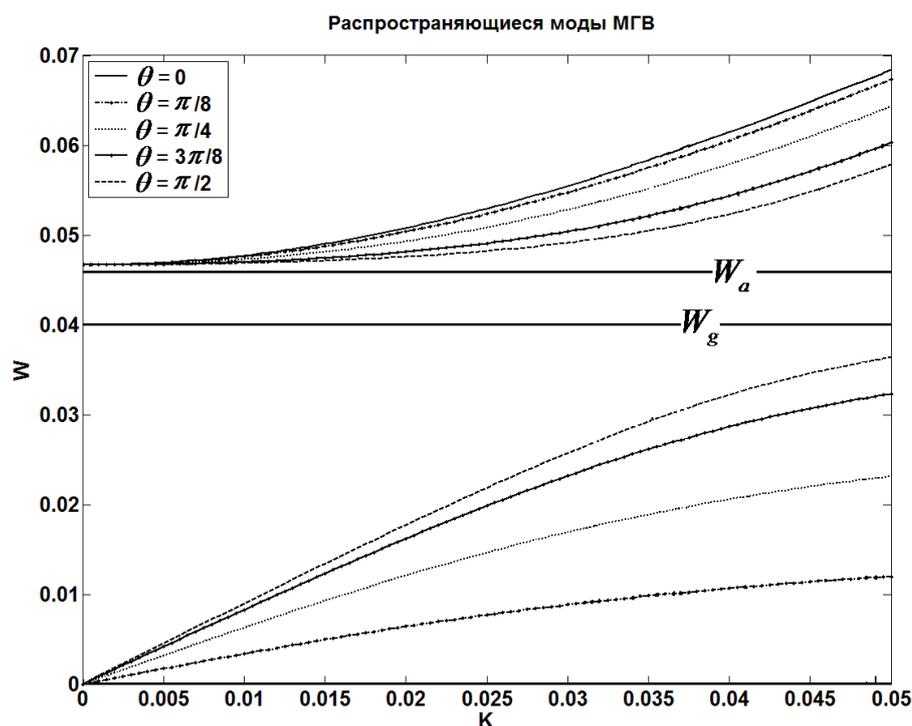


Рисунок 1. Дисперсионные кривые распространяющихся мод МГВ (верхние кривые отвечают ВЧ моде, нижние кривые – НЧ моде), построенные при значении азимутального угла $\varphi = 0^\circ$ для различных значений полярного угла θ .

Согласно полученным результатам, ВЧ мода распространяется без заметного затухания независимо от азимутального направления в частотном диапазоне 2.1- 3.2 мГц для длин волн ($\lambda \geq 230$ км). НЧ мода МГВ существует на частотах меньших 1.8 мГц при любых азимутальных углах. Данная мода не распространяется вдоль вертикали (сплошная черная линия на дисперсионных кривых отсутствует), но вместе с тем обе моды МГВ имеют возможность распространения вдоль магнитного поля ($\theta = \pi/2$). Отметим, что в среде с рассматриваемыми параметрами альвеновская мода не распространяется. Для сравнения с дисперсионными кривыми акустических и гравитационных волн на графике отмечены значения граничной акустической частоты $\omega_a = 0.013$ Гц ($W_a = 0.045$) и частоты Бранта-Вяйсяля $\omega_g = 0.012$ Гц ($W_g = 0.04$).

В работе [Бархатов и др., 2012] аналогичным образом были получены дисперсионные кривые распространяющихся мод МГВ в случае вертикальной ориентации геомагнитного поля (вдоль оси Z), что соответствует авроральным областям ионосферы. По результатам выполненных расчетов были обнаружены две распространяющиеся моды МГВ: «быстрая» мода, которая распространяется вдоль магнитного поля H_0 , и «медленная» мода, распространяющаяся под углом $\theta = 45^\circ$ к плоскости XY. Характерный частотный диапазон для обоих типов мод составлял до 0.25 Гц. В приэкваториальной области обнаружено то же число распространяющихся мод, однако здесь они более низкочастотны. Фазовые скорости МГВ, распространяющихся в авроральной области, характеризуются величинами порядка 4000 м/с для «быстрой» моды и 2500 м/с для более «медленной» моды. При этом значения скоростей для обеих мод неизменны в рассматриваемом диапазоне длин волн. В случае горизонтальной ориентации геомагнитного поля значения фазовых скоростей для распространяющихся мод МГВ, выраженные в единицах скорости звука V_S , приведены на рис. 2.

Скорости распространения ВЧ моды лежат в интервале 4700 - 550 м/с и уменьшаются при приближении направления распространения к горизонтальному. Для НЧ моды значения фазовых скоростей лежат в интервале 470 - 130 м/с и также заметно снижаются при приближении направления распространения к горизонтальному. Для всех направлений распространения скорости ВЧ и НЧ мод снижаются с уменьшением длины волны.

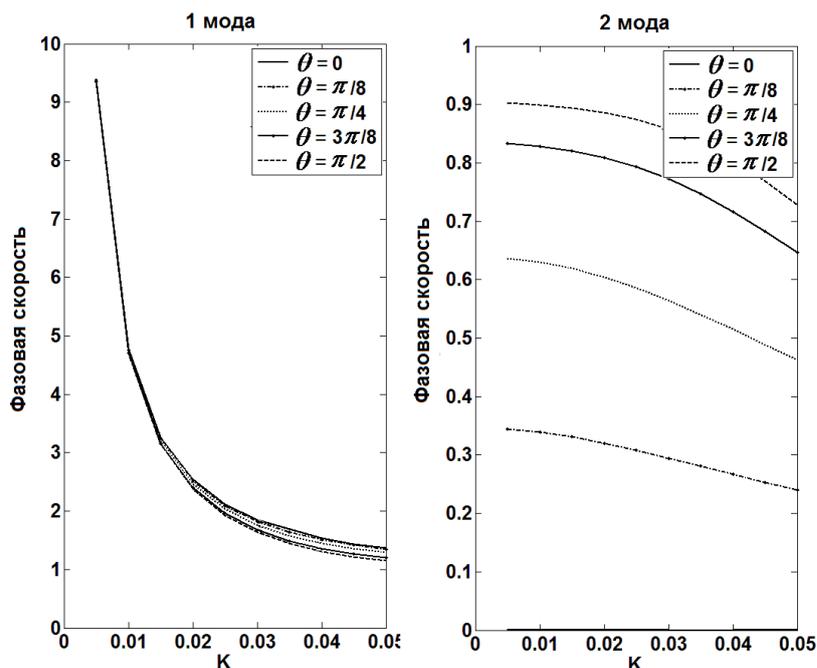


Рисунок 2. Фазовые скорости в единицах V_S трех распространяющихся мод МГВ ($\varphi = 0^\circ$) для различных углов θ .

Пространство волновых векторов МГВ

Дисперсионное соотношение для МГВ позволяет получить в пространстве волновых векторов зависимость горизонтального волнового числа (K_x), параллельного магнитному полю, от вертикального волнового числа (K_z) для волн, распространяющихся в приэкваториальной ионосферной среде с конечной проводимостью. Зависимость K_x от K_z ($K_y = 0$) приведена на рис. 3 для значений безразмерной частоты $W = 0.047$, соответствующей распространению ВЧ моды МГВ.

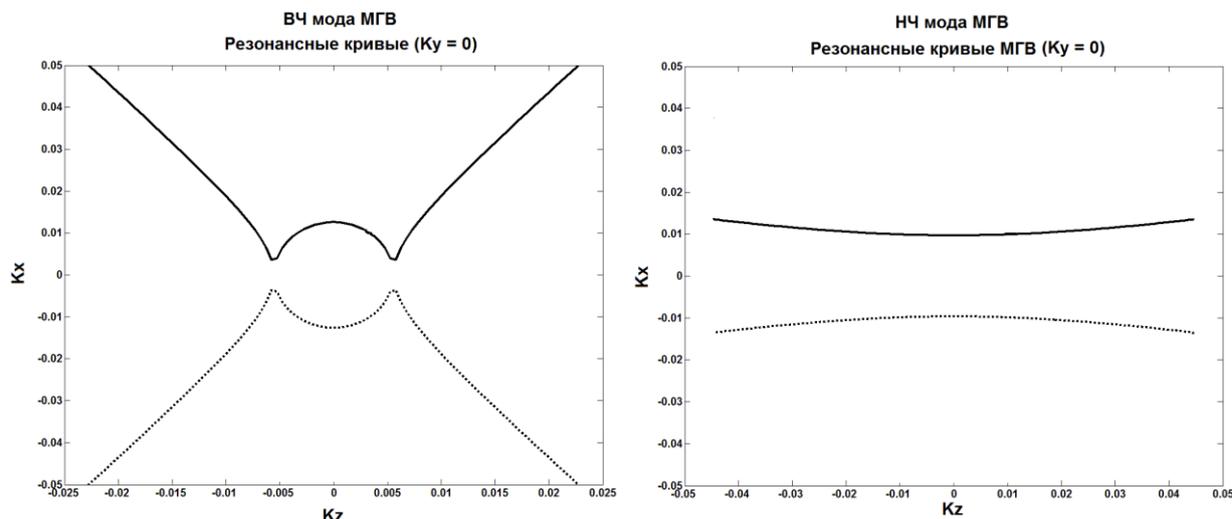


Рисунок 3. Зависимость безразмерных компонент волнового вектора K_x от K_z для ВЧ и НЧ мод МГВ на частоте источника $W = 0.047$ для ВЧ моды и $W = 0.0087$ для НЧ моды.

Согласно рис. 3, для ВЧ моды МГВ в области $-0.005 \leq K_x \leq 0.005$ направление распространения близко к горизонтальному (вдоль магнитного поля). В области более коротких вертикальных длин волн ($K_z > 0.005$), резонансная кривая в пространстве волновых векторов меняет направление и для данного диапазона ВЧ МГВ могут распространяться под углом как к магнитному полю, так и к вертикали. Резонансное направление распространения НЧ моды МГВ близко к вертикальному (вдоль поля гравитации).

Выводы

В данной работе проанализированы дисперсионные соотношения для гравитационных волн в условиях приэкваториальной ионосферы с конечной проводимостью при учете совместного влияния магнитного поля и силы тяжести.

1. Получены дисперсионные кривые двух распространяющихся мод МГВ для интервала длин волн ($\lambda \geq 230$ км). ВЧ мода распространяется без заметного затухания в частотном диапазоне 2.1 - 3.2 мГц. НЧ мода существует при частотах меньших 1.8 мГц, при этом вдоль вертикали она не распространяется. Вместе с тем обе моды МГВ имеют возможность распространения вдоль магнитного поля ($\theta = \pi/2$).
2. Определены характерные скорости распространения ВЧ и НЧ мод МГВ в рассматриваемой области ионосферы. Для ВЧ моды они лежат в интервале 4700 - 550 м/с, а для НЧ моды – в интервале 470 - 130 м/с. Для обеих мод скорости уменьшаются при приближении направления распространения к горизонтальному. Также для всех направлений распространения скорости снижаются с уменьшением длины волны.
3. Выполнена оценка направлений распространения ВЧ и НЧ мод МГВ с наименьшим затуханием. Согласно полученным результатам, резонансное направление распространения ВЧ моды МГВ близко к направлению геомагнитного поля, а для НЧ моды – к направлению вдоль поля гравитации.

Литература

- Бархатова О.М., Бархатов Н.А., Григорьев Г.И. Обнаружение магнитогравитационных волн в ионосфере по анализу максимально наблюдаемых частот на трассах наклонного зондирования // Изв. ВУЗов Радиофизика. Т.52. №10. С.761-778. 2009
- Бархатов Н.А., Бархатова О.М., Григорьев Г.И. Магнитогравитационные волны в ионосфере в условиях конечной проводимости // Изв. ВУЗов Радиофизика. Т.55. № 6. С. 421-430. 2012.
- Бархатова О.М. Косолапова Н.В. Обнаружение магнитогравитационных волн в интервалы сильных подземных землетрясений // Вестник ННГУ. Радиофизика. №3. С. 11-17. 2014.
- Сергеенко Н.П., Захаренкова И.Е., Шагимурагов И.И., Сазанов А.В., Рогова М.В. Анализ проявления в ионосфере крупномасштабных перемещающихся неоднородностей, ассоциированных с землетрясениями, по комплексным измерениям // Вестник МГТУ. Т.9. №3. С.445-452. 2006.
- Сорокин В.М., Федорович Г.В. Физика медленных МГД-волн в ионосферной плазме. М.: Энергоиздат. 136с. 1982.
- Hocke, K., Schlegel, K. A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982-1995 // Ann. Geophysicae 14, p.917-940, 1996.
- Liu J.Y., Chen C.H., Lin C.H., Tsai H.F. Ionospheric disturbances triggered by the 11 March 2011 M9.0 Tohoku earthquake // Journal of Geophysical Research, V. 116, A06319, 2011.
- Vorontsova E., Pilipenko V., Fedorov E., Sinha A.K., Vichare G. Modulation of total electron content by global Pc5 waves at low latitudes // Advances in Space Research, 57, 309-319, 2016.