

# ВОЗБУЖДЕНИЕ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ВИСТЛЕРОВ В Е-ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ ИНФРАЗВУКОВЫМИ ВОЛНАМИ ВО ВРЕМЯ ВОЗМУЩЕНИЙ РАЗЛИЧНОЙ ПРИРОДЫ

Гоков А.М.

*Харьковский государственный университет, Украина, 310077, Харьков, пл. Свободы 4  
тел.: 47-10-12, e-mail: Alexander.M.Gokov@univer.kharkov.ua*

*Аннотация* - Рассмотрен возможный механизм трансформации инфразвуковой волны, генерируемой в атмосфере возмущениями различной природы, в электромагнитное излучение в Е-области ионосферы, показана возможность генерации низкочастотного вистлера. Получено дисперсионное уравнение для таких волн и определена связь между частотами инфразвука и низкочастотных вистлеров.

## I. Введение

Известно, что инфразвуковые волны в диапазоне частот  $0,01 \text{ Гц} < f_a < 20 \text{ Гц}$  генерируются при сильных грозах, взрывах, землетрясениях (как на стадии подготовки, так и во время сейсмического толчка) и других возмущениях (см., например, [ 1,2 ] ). Такие волны достаточно свободно проникают до высот Е-области ионосферы ( $z \sim 100-170 \text{ км}$ ). Известно также, что вистлеры (свистовые моды) представляют собой электромагнитные волны, распространяющиеся в слабоионизированной плазме, для которой выполняются условия

$$V_{en} \ll \omega_{Be}, \quad V_{in} \gg \omega_{Bi}, \quad (1)$$

( $\omega_{Bi}$ ,  $\omega_{Be}$  - гирочастоты,  $V_{in}$  и  $V_{en}$  - частоты соударений с нейтралами ионов и электронов). Эти условия выполняются на высотах Е-области ионосферы. Вопросы распространения низкочастотного вистлера в этой области высот достаточно полно рассмотрены в [ 3 ]. В [ 4 ] решена задача генерации таких волн в Е-области ионосферы акустическими волнами. В настоящей работе показана возможность генерации низкочастотного вистлера инфразвуком.

## II. Основная часть

Из условий (1) следует, что электроны, участвуя в движении инфразвуковой волны, связаны с магнитным полем (с силовыми линиями), что приводит к периодической деформации магнитных силовых линий, т.е. генерации магнитозвуковых волн [ 5 ]. Исходная система уравнений состоит из уравнений Максвелла, уравнения сохранения количества движения частиц в двухкомпонентной плазме (линейное приближение, гауссова система координат), уравнения непрерывности; выражение для тока определено как:

$$\mathbf{j} = \sum_{\alpha=e,i} q_{\alpha} N_{\alpha} \mathbf{V}_{\alpha} \quad (2)$$

Изменения скорости  $\mathbf{V}_{\alpha}$  и напряженности электрического поля  $\mathbf{E}$  носят волновой характер. Обозначения здесь общепринятые, индексы  $e$  и  $i$  соответствуют электронам и ионам. Система координат выбрана так: волновой вектор совпадает с осью  $z$ , вектор магнитной индукции  $\mathbf{B}_0$  находится в плоскости  $yz$ , угол  $\mathbf{kB}_0 = \theta$  ( $\mathbf{k}$  - волновой вектор). Полагаем массу ионов достаточно большой, что позволяет пренебречь действием магнитного поля на

ионы. Вынужденные колебания ионосферной плазмы в результате воздействия на нее инфразвуковой волны рассматриваем как квазистационарный фон по сравнению с собственными колебаниями плазмы. Физически эти предположения в Е-области ионосферы оправданы. Методика получения дисперсионного уравнения подобна [ 5 ]. Из уравнений Максвелла находится волновое уравнение, в которое подставляется выражение для тока  $\mathbf{j}$  в матричной форме, полученное из уравнения сохранения количества движения

$$\mathbf{j} = \sigma (\mathbf{E} + \mathbf{a}_{\alpha} \mathbf{A}_{\alpha}), \quad (3)$$

Здесь  $\mathbf{a}_{\alpha} = m_{\alpha} / q_{\alpha} \omega$ ,  $\mathbf{A}_{\alpha} = \mathbf{A}_{\alpha}(\omega, \omega_{Bi}, \omega_{Be}, q_{\alpha})$ ;  $q_{\alpha}$  и  $m_{\alpha}$  - заряд и масса частиц. Это позволяет найти дисперсионное уравнение в общем виде как и в [ 5 ], из которого для волн с частотами  $\omega_{Bi} \ll \omega \ll \omega_{Be}$  (низкочастотные вистлеры), определим дисперсионное уравнение:

$$n_z^2(\omega) = \omega_p^2 / \omega \omega_{Be} \cos \theta, \quad (4)$$

Из (4) спектр таких волн определяется как:

$$\omega_3(k) = |\omega_{Be} \cos \theta| k^2 c^2 / \omega_p^2, \quad (5)$$

Волны, описываемые дисперсионным соотношением (4), являются чисто электронными и могут распространяться в ионосферной плазме в узком конусе углов с осью вдоль магнитного поля [ 3,5 ]. Собственное решение (5) позволяет определить связь между  $f_a$  и частотами генерируемых в этой области высот низкочастотных вистлеров  $f_3$  и провести расчеты.

На основе литературных данных о  $f_a$ , полученных в экспериментах во время гроз, землетрясений и взрывов, и соотношения (5) проведены расчеты  $f_3$  для различных состояний ионосферы (в зависимости от времени суток, года, возмущенности, поскольку плазменная частота является функцией плотности электронов); магнитное наклонение  $\sim 65^\circ$ , скорость инфразвуковой волны бралась  $V_a = 350 \text{ м/с}$ . Расчеты показали, что для  $0,01 \text{ Гц} < f_a < 5 \text{ Гц}$  частоты вистлеров  $f_3$  изменяются от сотен Гц до сотен кГц. Эти расчеты подтверждаются экспериментальными данными из литературы, когда обнаружено усиление вистлеров в эпицентральной зоне землетрясения, в районе сильных гроз и т.д.

## III. Заключение

Показана возможность генерации низкочастотных вистлеров в Е-области ионосферы инфразвуковыми волнами. Получено дисперсионное уравнение и определена связь между частотами инфразвука и вистлера; на основе литературных экспериментальных об интервале частот инфразвука, генерируемого

в атмосфере во время возмущений различной природы, рассчитан интервал частот, в котором возможна генерация вистлеров.

Работа выполнена при поддержке Украинского научно-технологического центра, грант N 471.

#### IV. Список литературы

- [1] Григорьев Г.И., Докучаев В.П. Инфразвук и внутренние гравитационные волны при грозových разрядах в атмосфере // Известия АН СССР. Физика Атмосферы и океана. 1981. Т.17. N 7. С. 690-697.
- [2] Альперович А.С., Вугмейстер Б.О., Гохберг М.Б. и др. Об опыте моделирования магнитосферно-ионосферных эффектов при сейсмических явлениях // Доклады АН СССР. 1983. N 3. С. 573-578.
- [3] Мазур В.А. О распространении низкочастотного вистлера в ионосфере // Известия вузов. Радиофизика. 1988. Т. 31. N 12. С. 1423-1430.
- [4] Сурков В.А. Возбуждение низкочастотных электромагнитных возмущений ионосферы акустическими волнами // М.: Препринт МИФИ N 041-89. 1989. 24 с.

- [5] Гинзбург В.Л., Рухадзе А.А. Волны в магнитоактивной плазме. М.: Наука, 1970. 207 с.

#### LOW FREQUENCY WHISTLERS GENERATED IN THE IONOSPHERIC E-REGION BY INFRASOUND WAVES DURING DISTURBANCES AT DIFFERENT NATURE

Gokov A.M.

*Kharkov State University, 4 Svoboda Sq., Kharkov, 310077, Ukraine*

Possible mechanisms of the transformation of infrasound waves which are generated in the atmosphere by disturbances of various origins into electromagnetic emissions in the ionospheric E-region are discussed; the feasibility of generations of low-frequency whistlers is proved. Dispersion equations for such waves are obtained; relationship between frequencies of infrasound and low-frequency whistlers is studied.