

## О ВЛИЯНИИ ПЫЛЕВОЙ ЗВУКОВОЙ МОДЫ В ЗАПЫЛЕННОЙ ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЕ НА КОСМИЧЕСКУЮ ПОГОДУ

С.И. Копнин, С.И. Попель

### EFFECT OF THE DUST ACOUSTIC MODE IN DUSTY IONOSPHERIC PLASMA ON SPACE WEATHER

S.I. Kopnin, S.I. Popel

Космическая погода является относительно новой и важной областью исследований, связанной с проблемами радиосвязи, космических миссий, диагностики ионосферы и космической плазмы, обнаружения загрязняющих веществ и космического мусора, прогнозирования погоды и глобального потепления. Ранее было показано, что наличие заряженных нано- и микромасштабных частиц в околоземном пространстве и в атмосфере Земли может приводить к возможности существования пылевой звуковой моды, влияющей на свойства окружающей среды. Это может быть использовано для диагностики ионосферной, магнитосферной и околоземной комплексной плазмы. Обсуждаются источники заряженных пылевых частиц и воздействие пылевой звуковой моды на околоземную космическую погоду.

Space weather is a relatively new and important field of research associated with problems of radio communication, space missions, ionosphere and space plasma diagnostics, detection of pollutants and space debris, weather prediction, and global warming. Recently it has been shown that existence of nano- and microscale electrically charged particles in near-Earth space and in the Earth's atmosphere can produce the dust acoustic mode which affect on environment properties. This can be used for diagnostics of the ionospheric, magnetospheric, and near-Earth plasmas. Sources of charged dust particles and effects of dust acoustic mode on the near-Earth space are examined.

Космическая погода имеет отношение ко всему, что происходит в околоземном пространстве, в частности, к влиянию на космические и наземные исследовательские комплексы и системы. К околоземному пространству относят магнитосферу, термосферу и ионосферу Земли, а также поверхность Солнца, так как оно является основным источником излучения высокоэнергичных частиц солнечного ветра. Таким образом, космической погодой можно называть всевозможные процессы, протекающие в околоземном пространстве и влияющие на земную атмосферу и жизнедеятельность человека. Хорошо известно, что межпланетная, магнитосферная, ионосферная и межзвездная плазма содержит заряженные пылевые частицы. В настоящей работе рассматривается влияние заряженных пылевых частиц на космическую погоду.

Концентрация пыли в ионосфере Земли существенно возрастает во время метеорных потоков. В результате на высотах 80–120 км образуются пересыщенные пары главным образом щелочноземельных металлов, таких как натрий, кальций, магний и др. Последующая конденсация пересыщенных паров металлов приводит к формированию пылевых частиц. В работе [Копнин, 2007] была показана возможность возбуждения пылевых звуковых возмущений в результате развития модуляционной неустойчивости электромагнитных волн в запыленной ионосферной плазме. Закон дисперсии пылевых звуковых волн в ионосфере имеет вид

$$\omega_s(K) = \sqrt{\omega_d^2 b^{-1}(K) - (v_{dn}/2)^2} - i v_{dn}/2, \quad (1)$$

где  $\omega_d^2 = 4\pi n_{d0} q_{d0}^2 / m_d$  – пылевая плазменная частота,  $n_d$  – концентрация пылевых частиц,  $q_d$  – заряд пылевых частиц,  $m_d$  – их средняя масса,  $v_{dn} = (4/3)\pi a^2 \times \sqrt{8T_{n0}/(\pi m_n)} n_n (m_n/m_d)$  – эффективная частота столкновений пылевых частиц с нейтральной компонентой ионосферной плазмы,  $n_n$ ,  $m_n$ ,  $T_{n0}$  – концентрация, масса

и температура нейтралов,  $a$  – размер пылевых частиц. Индекс 0 соответствует невозмущенным параметрам. В случае  $q_d > 0$  [Копнин, 2007]

$$b(K) = 1 + (K\lambda_{de})^{-2} (1 + \bar{v}_e/v_{ch}), \quad (2)$$

а в случае  $q_d < 0$

$$b(K) = 1 + (K\lambda_{de})^{-2} \times \left[ 1 + (1 + \tau^{-1}) \bar{v}_e/v_{ch} \right] + (K\lambda_{de})^{-2}. \quad (3)$$

Здесь  $\bar{v}_e$  – частоты столкновений электронов с пылевыми частицами;  $\lambda_{de} = \sqrt{T_e/(4\pi n_e e^2)}$ ,  $\lambda_{di} = \sqrt{T_i/(4\pi n_i e^2)}$  – электронный и ионный радиусы Дебая;  $v_{ch}$  – характерная частота зарядки,  $T_{e(i)}$ ,  $m_{e(i)}$  – температура и масса электронов/ионов,  $\tau = T_{i0}/T_{e0}$ ,  $v_{ch} = -\partial \Gamma^{eq}(q_d)/\partial q_d$ , где  $\Gamma^{eq}(q_d)$  – полный равновесный ток на пылевую частицу,  $e$  – заряд электрона.

Динамика заряженных пылевых частиц и нейтралов в ионосферной плазме описывается следующими уравнениями (ср. [Копнин, 2007]):

$$\begin{aligned} \partial n_{d1}/\partial t + \text{div } n_{d0} \mathbf{v}_d &= 0, \\ m_d (\partial/\partial t + \mathbf{v}_{dn}) \mathbf{v}_d &= -q_{d0} \nabla \phi, \\ \partial n_{n1}/\partial t + \text{div } (n_{n0} \mathbf{v}_n) &= 0, \\ m_n n_n (\partial \mathbf{v}_n/\partial t + (\mathbf{v}_n \nabla) \mathbf{v}_n) &= \\ &= -\nabla P_n + m_d v_{dn} n_d \mathbf{v}_d. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь  $P_n = T_n n_n$  – давление нейтральной компоненты,  $\phi$  – потенциал электрического поля пылевых звуковых возмущений,  $\mathbf{v}_{d(n)}$  – гидродинамическая скорость заряженных пылевых частиц (нейтралов). На высотах, меньших 120 км, т. е. фактически в области интересующих нас высот, акустические волны с частотами  $\ll 50$  Гц не подвержены влиянию вязкости. Индекс 1 обозначает возмущения соответствующих величин.

Из (4) и (5) следует, что для плоской монохроматической пылевой звуковой волны, распространяющейся по закону дисперсии (1), колебания звукового поля описываются выражением:

$$P_n(\mathbf{r}, t) = P_{n0} + \varphi_0 \frac{n_{d0} q_{d0} v_{dn} e^{i \arctg(2\omega_{S0}(K)/v_{dn})}}{\sqrt{(v_{dn}/2)^2 + \omega_{S0}^2(K)}} \times \left[ e^{-v_{dn}t} - e^{-v_{dn}t/2} e^{-i[\omega_{S0}(K)t - (\mathbf{K}, \mathbf{r})]} \right]. \quad (6)$$

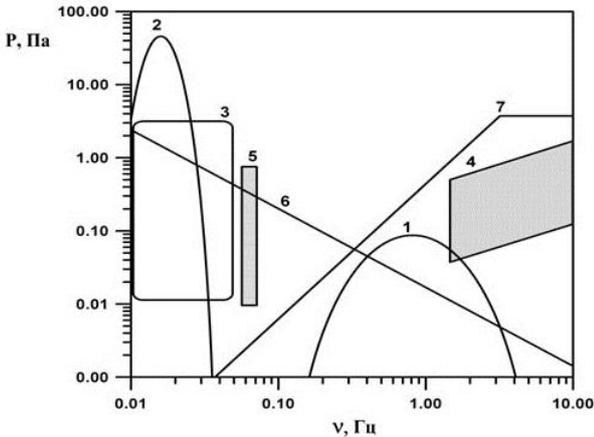
Здесь  $P_{n0}$  – невозмущенное фоновое давление на данной высоте,  $\varphi_0$  – амплитуда низкочастотных пылевых звуковых возмущений,  $\omega_{S0}(K) = \text{Re} \omega_S(K)$  – действительная часть частоты пылевых звуковых волн (1).

С учетом (4)–(6) можно ожидать, что у поверхности Земли максимальная амплитуда инфразвуковых колебаний, вызванных пылевыми звуковыми возмущениями в запыленной плазме нижней ионосферы, составляет порядка:

$$P_{n1\max}(r, t) = \frac{\rho_0 V_1}{4\pi R} \left( \frac{\delta K}{K} \right) \times \left( \frac{\varphi_0 n_{d0} q_{d0}}{P_{n0}} \right)^2 \times \frac{\exp(m_n g R / 2T_{n0})}{\omega_{S0}^2(K) + v_{dn}^2}, \quad (7)$$

где  $R$  – высота дислокации пылевого облака в ионосферной плазме  $V_1$  – объем облака,  $\rho_0 = m_n n_n$  – плотность стандартной атмосферы на соответствующей высоте,  $\delta K$  – абсолютная величина волнового вектора акустической инфразвуковой волны.

Для характерных параметров запыленной нижней ионосферы [Навнес, 2001]  $P_{n1\max}$  может составлять несколько паскалей. На рисунке представлены амплитудно-частотные зависимости, характеризующие распределение инфразвуковых колебаний у поверхности



Амплитудно-частотные зависимости, характеризующие распределение инфразвуковых колебаний у поверхности Земли от различных источников. Показаны область инфразвуковых возмущений, порождаемых малыми взрывами (1); область инфразвуковых волн от больших взрывов (2); инфразвуковые колебания от волн Рэлея при землетрясениях, магнитных бурь, ураганов, смерчей, волн, ассоциируемых с горами (3); область волн, источником которых является сверхзвуковая авиация, грозы (4); микробаромы (5); область, ограничивающая зону существования локального турбулентного шума (6); область существования волн, связанных с пылевой звуковой модой во время метеорных потоков (7).

Земли от различных источников, а также инфразвуковые колебания, происхождение которых связано с существованием пылевых звуковых волн в нижней ионосфере Земли во время метеорных потоков (область 7, которая определена для характерных параметров запыленной ионосферной плазмы на высоте 90 км). Видно, что для частот от нескольких десятых герца до нескольких десятков герц генерация инфразвуковых колебаний пылевыми звуковыми возмущениями во время метеорных потоков может быть наиболее важным источником инфразвука у поверхности Земли.

Пылевые звуковые возмущения могут служить также источником акустико-гравитационных волн (АГВ), имеющих длины, большие или порядка 1 км и частоты, находящиеся в инфразвуковой области. Детальное изучение процессов возбуждения АГВ требует знания спектров пылевых звуковых возмущений во время интенсивных метеорных потоков и выходит за рамки данной работы. Рассмотрим здесь лишь основные проявления АГВ во время метеорных потоков, которые могут быть зафиксированы наземными наблюдателями.

Для описания распространения акустико-гравитационных волновых возмущений уравнения (5) необходимо дополнить уравнением состояния (или энтропии) среды:

$$\partial P / \partial t + (\mathbf{v}_n \nabla) P + \gamma P \text{div} \mathbf{v}_n = 0. \quad (8)$$

Решение системы уравнений (5), (8) в виде плоских волн приводит к дисперсионному соотношению

$$\omega^2 = - \frac{k_{s,x}^2}{k_{S,x}^2 + k_{S,z}^2 + 1/4H^2} \times \left( \frac{d\rho_0^{-1}}{dz} + \frac{1}{\gamma\rho_0 P_{n0}} \frac{dP_{n0}}{dz} \right) \frac{dP_{n0}}{dz}. \quad (9)$$

Из (9) видно, что в тех областях атмосферы, где  $\omega^2 < 0$ , развивается конвективная неустойчивость, приводящая к раскачке АГВ. Условие  $\omega^2 < 0$  определяет область, где выполняется неравенство

$$\gamma\rho_0^{-1} (d\rho_0/dz) < P_{n0}^{-1} (dP_{n0}/dz). \quad (10)$$

Область конвективно-неустойчивых АГВ располагается на высотах 110–130 км. В результате этой неустойчивости возможно увеличение амплитуды этих волн, причем раскачиваться будут только те волны, которые проходят зону конвективной неустойчивости.

При достижении амплитудами АГВ значений порядка фонового давления окружающей среды волновой процесс переходит на нелинейный режим [Абурджания, 2006]. В результате могут формироваться стационарные локализованные нелинейные вихревые структуры. Их наличие может приводить к перемешиванию атомарного кислорода, что влечет за собой усиление интенсивности зеленого излучения ночного неба [Абурджания, 2006] на величину порядка 10 %.

Итак, во время метеорных потоков на высотах 80–120 км происходит абляция метеорного вещества, из которого формируются частицы наномасштабного размера. Находясь в активной плазменной

среде во всем диапазоне высот 80–120 км, эти частицы приобретают электрический заряд. Наличие заряженной пылевой компоненты приводит к существованию пылевых звуковых возмущений в плазме ионосферы, важным механизмом возбуждения которых служит модуляционная неустойчивость электромагнитных волн. Генерация инфразвуковых колебаний происходит в результате взаимодействия пылевых звуковых возмущений с нейтральным компонентом ионосферной плазмы. Можно ожидать, что у поверхности Земли максимальная амплитуда инфразвуковых колебаний, вызванных пылевыми звуковыми возмущениями в запыленной плазме нижней ионосферы, составляет несколько паскалей. Таким образом, в диапазоне частот от нескольких десятых герца до нескольких десятков герц генерация инфразвуковых колебаний пылевыми звуковыми возмущениями во время метеорных потоков может быть наиболее важным источником инфразвука у поверхности Земли. Наличие пылевых звуковых возмущений может также приводить к возникновению акустико-гравитационных вихрей на высотах 110–120 км. В результате возможно усиление относительной интенсивности зеленого излучения ночного неба на величину порядка 10 %, что связано с формированием нелинейных вихревых структур на высотах 110–120 км.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российской академии наук (Программа фундаментальных исследований ОНЗ РАН «Наноразмерные частицы в природе и техногенных продуктах: условия нахождения, физические и химические свойства и механизмы образования»); Программа фундаментальных исследований ОФН РАН № 15 «Плазменные процессы в солнечной системе»; Фонда «Династия» и РФФИ (проект № 11-02-90450-Укр\_ф\_а), а также по программе Ведущих научных школ НШ-4304. 2010.5.

#### *СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ*

Абурджания Г.Д. Самоорганизация нелинейных вихревых структур и вихревой турбулентности в диспергирующих средах. М.: КомКнига, 2006. 328 с.

Копнин С.И., Попель С.И., Минг Ю. Модуляционное возбуждение низкочастотных пылевых звуковых колебаний в нижней ионосфере Земли // Физика плазмы. 2007. Т. 33. С. 323–336.

Havnes O., Aslaksen T., Brattli A. Charged dust in the Earth's middle atmosphere // Physica Scripta. 2001. V. 89. P. 133–137.

*Институт динамики геосфер РАН, Москва, Россия*