

Полученные результаты хорошо согласуются с результатами работы [3]. По данным регулярных наблюдений за характеристиками движения космических объектов наземными радиотехническими комплексами, входящими в систему воздушно-космической обороны Северной Америки (NORAD).

Было выявлено, что за две недели до землетрясений нарастают вариации торможения низкоорбитальных КА, а за 3-6 суток до сильных коровых землетрясений с эпицентрами на суше торможение низкоорбитальных КА в верхней атмосфере усиливается [3]. Наличие этих эффектов и выявленных аномалий по данным акселерометра «Кактус» подтверждает гипотезу о возмущениях нейтральной компоненты в околоземном космическом пространстве перед сильными землетрясениями.

Таким образом, в результате обработки данных о микроускорениях с бортового акселерометра «Кактус» впервые выявлено:

1. Повышенная плотность верхней атмосферы над сейсмоопасным регионом за 1-6 суток до сильного тектонического землетрясения;
2. В первые сутки после землетрясения проявляется всплеск значений средней плотности и ее дисперсии.
3. Вариации плотности атмосферы над сейсмоопасным регионом через двое суток после землетрясения резко уменьшаются.

Авторы благодарны профессорам Липеровскому В.А. и Волкову И.И. за полезные советы и внимание к полученным результатам.

Литература

1. Липеровский В.А. Мейстер К.-В., Липеровская Е.В., Похотелов О.А. Модели связей в системе литосфера-атмосфера-ионосфера перед землетрясениями // Геомагнетизм и Аэрономия, 2008, № 4. С. 54.
2. Тертышников А.В. Сейсмоозонные эффекты и проблема прогнозирования землетрясений. – СПб.: ВИКА, 2000.
3. Чернявский Г.М., Тертышников А.В., Скрипачев В.О. Вариации торможения космических аппаратов в верхней ионосфере перед сильными землетрясениями // Доклады академии наук, 2009, том 424, № 4.
4. К. Мое, М. М. Мое. The high-latitude thermospheric mass density anomaly: A historical review and a semi-empirical model // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. vol. 70, Issue 5, 2008. p.794.
5. Ежегодник БСЭ 1976г [Электронный ресурс] /<http://epizodsspace.narod.ru/bibl/ejeg/1976/76.html>.
6. National Earthquake Information Center – NEIC. [Электронный ресурс] /<http://earthquake.usgs.gov/regional/neic/>.
7. Инженерный справочник по космической технике / Под ред. Солодова А.В. – М.: Воениздат, 1977. 430 с.

ACOUSTIC-GRAVITY MODEL OF THE LITHOSPHERE-ATMOSPHERE- IONOSPHERE COUPLING BEFORE EARTHQUAKES АКУСТИКО-ГРАВИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ЛИТОСФЕРНО-АТМОСФЕРНО- ИОНОСФЕРНОЙ СВЯЗИ ПЕРЕД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ

Meister C.-V.¹, Hoffmann D.H.H.¹, Liperovsky V.A.²

¹Technische Universit Darmstadt, Schlossgartenstr. 9, Darmstadt

²Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences,
Bol'shaya Gruzinskaya str. 10, Moscow

Развивается многожидкостная магнитогидродинамическая теория конверсии акустико-гравитационных волн в электромагнитные с учетом широтных профилей плазменных параметров и электромагнитных полей в атмосфере и ионосфере и с учетом конечной электропроводности. Сделан вывод, что на высотах E-области ионосферы над сейсмоактивными регионами Альвеновские волны и волны Фарлей-Бунемановского типа могут возбуждаться за несколько дней до сильных землетрясений.

Introduction. In some of the models of lithosphere-atmosphere-ionosphere coupling before earthquakes it is assumed that atmospheric acoustic and acoustic-gravity waves are generated several days before earthquakes in earthquake

preparation zones and propagate from the Earth's surface through the atmosphere up to ionospheric altitudes [1, 2]. There, due to collisions between the neutral and charged particles, disturbances of the charged particle densities are possible. In the ionospheric E-layer, atmospheric acoustic and acoustic-gravity waves

especially interact with sporadic layers and cause nonlinear current systems. Investigating the interaction of infrasound waves of seismic origin with sporadic layers is was already found that observable by ground-based radar stations waves of the Farley-Buneman type may be excited [3, 4]. Besides, in [5] it was concluded, that at E-region altitudes the conversion of sound waves into Alfvén waves is possible.

But the theoretical description of the wave conversion in a stratified magnetized plasma has yet to be further developed. Solutions for acoustic waves are well-described for non-magnetic systems using one-fluid magnetohydrodynamics, and studying electromagnetic waves one usually neglects the stratification of the medium and the finite electrical conductivity values [5, 6], or the collisions between neutral and charged particles [7]. Thus, in the present paper some steps are made to consider within the frame of multi-fluid magnetohydrodynamics altitudinal profiles of particle velocities and electromagnetic fields.

Excitation of electromagnetic waves by acoustic-gravity ones

In the present magnetohydrodynamic model, the conversion of acoustic-gravity waves into electromagnetic ones is described starting with the continuity equations of the charged ($a=e$ - electron, $b=i$ - ion), and neutral ($a=n$) particles,

$$\frac{\partial n_a}{\partial t} + \nabla(n_a \bar{v}_a) = 0 \quad (1)$$

the momentum balances

$$n_a \frac{\partial \bar{v}_a}{\partial t} = -\frac{\text{grad} \hat{P}_a}{m_a} + \frac{q_a n_a}{m_a} \bar{E} + n_a \bar{\omega}_a \times \bar{v}_a + n_a \bar{g} - \frac{n_a}{m_a} \sum_b m_{ab} \nu_{ab} (\bar{v}_a - \bar{v}_b) \quad (2)$$

and the equation of state

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} + \bar{v} \nabla \right] \rho = 0 \quad (3)$$

$$p = \sum_a p_a \quad \rho = \sum_a m_a n_a \quad \rho \bar{v} = \sum_a m_a n_a \bar{v}_a \quad \bar{v} = \frac{\sum_a m_a n_a \bar{v}_a}{\sum_a m_a n_a}$$

\bar{v}_a , m_a , $\bar{\omega}_a$, and \hat{P}_a describe the velocities, masses, cyclotron frequencies, and tensors of the partial pressure of the particles of type a , respectively. $m_{ab} = m_a m_b / (m_a + m_b)$, and ν_{ab} are the frequencies of the collisions between particles of kinds a and b . b presents charged and neutral particles too.

Besides, the Maxwell equations are taken into account,

$$\text{rot} \bar{B}(\vec{r}, t) = \mu_0 \vec{j}(\vec{r}, t) = \mu_0 q_e n_e (\delta \bar{v}_e - \delta \bar{v}_i) \quad (4)$$

$$\text{rot} \bar{E}(\vec{r}, t) = -\frac{\partial \bar{B}(\vec{r}, t)}{\partial t} \quad (5)$$

$$\text{div} \bar{B}(\vec{r}, t) = 0 \quad (6)$$

$$\text{div} \bar{E}(\vec{r}, t) = \frac{q_e}{\epsilon_0} (n_e - n_i) \quad (7)$$

Under equilibrium conditions, when all particle velocities equal zero, one obtains for the momentum balance

$$-\frac{\text{grad} \hat{P}_{a0}}{m_a} + \frac{q_a n_{a0}}{m_a} \bar{E}_0 + n_{a0} \bar{g} = 0 \quad (8)$$

the solution

$$n_{a0}(z) = n_{a0}(z_0) \frac{T_{a0}(z)}{T_{a0}(z_0)} \exp(-z/H_a) \quad H_a = z / \left\{ \int_{z_0}^z \frac{m_a g - q_a E_{0z}(z^*)}{k_B T_{a0}(z^*)} dz^* \right\} \quad (9)$$

describes the altitudinal-dependent scale height of the Earth's atmosphere and ionosphere. For simplicity, in this paper developing an analytical limiting theory, will be further considered to be constant. This

approximation corresponds to an isothermal atmosphere. Future numerical calculations will be performed for altitudinal dependent scale heights.

Next, it is supposed that the plasma system is perturbed by an acoustic-gravity wave, expressed by \vec{v}_n . In such a case, also the partial pressures and densities of the plasma particles as well as the electromagnetic field show deviations from the equilibrium values,

$$\vec{v}_a = \delta\vec{v}_a, \quad n_a = n_{a0} + \delta n_a, \quad p_a = p_{a0} + \delta p_a, \quad \vec{E} = \vec{E}_0 + \delta\vec{E}, \quad \vec{B} = \vec{B}_0 + \delta\vec{B}. \quad (10)$$

The index "0" designates the unperturbed values of the parameters. In the following it is assumed, that the unperturbed magnetic induction is uniform and directed along the z-axis. Viscosity effects are neglected. On substituting the expressions (10) into eqs. (1-3), and retaining only terms of first order in the perturbations, one arrives at the following equations:

$$\frac{\partial \delta n_a}{\partial t} + \nabla(n_{a0} \delta \vec{v}_a) = 0, \quad (11)$$

$$n_{a0} \frac{\partial \delta \vec{v}_a}{\partial t} = -\frac{1}{m_a} \text{grad} \delta p_a + \frac{q_n}{m_a} \delta n_a \vec{E}_0 + \frac{q_a}{m_a} n_{a0} \delta \vec{E} + n_{a0} \delta \vec{v}_a \times \vec{\omega}_{a0} + \delta n_a \vec{g} - \frac{n_{a0}}{m_a} \sum_b m_{ab} \nu_{ab} (\delta \vec{v}_a - \delta \vec{v}_b) \quad (12)$$

$$\delta \vec{v}_a \left[\nabla p_0 - \rho_0 \nabla \rho_0 \right] + \rho_0 \frac{\partial \delta p}{\partial t} - \rho_0 \frac{\partial \delta \rho}{\partial t} = 0. \quad (13)$$

From the Maxwell equations follows for the electromagnetic field of the plasma disturbances

$$\text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \delta \vec{B}}{\partial t}, \quad (14)$$

$$\text{div} \vec{E} = \frac{q_e}{\epsilon_0} (\delta n_e - \delta n_i), \quad (15)$$

$$\text{rot} \vec{B} = \mu_0 \delta \vec{j} = \mu_0 n_e q_e (\delta \vec{v}_e - \delta \vec{v}_i), \quad (16)$$

$$\text{div} \vec{B} = 0. \quad (17)$$

Usually, to obtain the relations for the waves excited in the non-stratified plasma, one introduces the Fourier transformation of the plasma parameters and of the electromagnetic field. But, since the plasma pressure and density show an exponential decrease with the altitude, solving the system of equations (11-17), for the plasma and electromagnetic field parameters here the following expressions are assumed:

$$\delta n_a = \delta n_{a0} \exp \left\{ -\frac{z}{2H} + i\vec{k}\vec{r} - i\omega t \right\}, \quad (18)$$

$$\delta p_a = \delta p_{a0} \exp \left\{ -\frac{z}{2H} + i\vec{k}\vec{r} - i\omega t \right\}, \quad (19)$$

$$\delta \vec{v}_a = \delta \vec{v}_{a0} \exp \left\{ \frac{z}{2H} + i\vec{k}\vec{r} - i\omega t \right\}, \quad (20)$$

$$\delta \vec{E} = \delta \vec{E}_0 \exp \left\{ \frac{z}{2H} + i\vec{k}\vec{r} - i\omega t \right\}, \quad (21)$$

Substituting in the continuity and momentum equations (11-12) as well as in the equation of state (13) the relations (18-21), one finds in the case of an isothermal system with $H = \text{const}$ ($\omega_{az} = q_a B_z / m_a$)

$$-i\omega \delta n_{a0} + \left(ik_z - \frac{1}{2H} \right) n_{a0} \delta v_{a0z} + ik_x n_{a0} \delta v_{a0x} + ik_y n_{a0} v_{a0y} = 0, \quad (22)$$

$$-i\omega n_{a0} \delta v_{a0x} = -\frac{ik_x}{m_a} \delta p_{a0} + \frac{q_a}{m_a} (E_{0x}(z) \delta n_{a0} + n_{a0} \delta E_{0x}) + \quad (23)$$

$$n_{a0} \omega_{az} \delta v_{a0y} - \frac{n_{a0}}{m_a} \sum_b m_{ab} \nu_{ab} (\delta v_{a0x} - \delta v_{b0x}),$$

$$-i\omega n_{a0}\delta v_{a0y} = -\frac{ik_y}{m_a}\delta p_{a0} + \frac{q_a}{m_a}(E_{0y}(z)\delta n_{a0} + n_{a0}\delta E_{0y}) - \quad (24)$$

$$-n_{a0}\omega_{az}\delta v_{a0x} - \frac{n_{a0}}{m_a}\sum_b m_{ab}v_{ab}(\delta v_{a0y} - \delta v_{b0y}),$$

$$-i\omega n_{a0}\delta v_{a0z} = -\frac{1}{m_a}(ik_z + \frac{1}{2H})\delta p_{a0} + \frac{q_a}{m_a}(E_{0z}(z)\delta n_{a0} + n_{a0}\delta E_{0z}) - \quad (25)$$

$$-g\delta n_{a0} - \frac{n_{a0}}{m_a}\sum_b m_{ab}v_{ab}(\delta v_{a0z} - \delta v_{b0z}),$$

$$\frac{\gamma-1}{H}p_0\delta v_{0z} - i\omega\delta p_0 + i\omega c_s^2\delta\rho_0 = 0, \quad c_s^2 = \frac{\eta p_0}{\rho_0} \quad (26)$$

The system of equations (14-17, 16-22) describes the conversion of acoustic-gravity/infrasound waves, propagating into the Earth's atmosphere and ionosphere, into electromagnetic waves, especially into Farley-Buneman [3, 4] and Alfvén ones [5]. It is found, that the conversion is possible when the frequency of the acoustic wave is larger than the cut-off frequency $\Omega = c_s/2H$ so that the waves penetrate into the E-layer [3-5]. The growth rate of Farley-Buneman waves is determined by the collision frequencies of the charged particles with the neutral ones. In [3, 4], considering acoustic waves with frequencies of 5×10^{-3} -20 Hz and neglecting viscosity effects, the waves were found to be caused by the -y components of the electron velocities. It was obtained, that there exist always three waves of Farley-Buneman type, one possesses a growing amplitude, and the other two waves are damped. The non-damped wave has, in the E-layer, wave numbers of the order of 1 - 70 m^{-1} . One could note that a few aspects of action on the ionosphere of acoustic and acoustic-gravity waves were analyzed in papers [8, 9].

Conclusions.

1. First steps are performed to describe the conversion of acoustic waves generated by earthquake precursors into electromagnetic ones of the stratified atmosphere of the Earth using many-fluid magnetohydrodynamics.
2. One may conclude that in the E-region of the ionosphere Alfvén waves and waves of the Farley-Buneman type are generated in seismo-active regions a few days before earthquakes.
3. Thus, acoustic-gravity waves may influence the diffusion of sporadic E-layers at distances of about 1000-1200 km from the wave generation region.
4. Additional Joule heating caused by the acoustic-gravity waves - and the corresponding increased intensities of the vertical atmospheric currents - result also in modifications of the charged particle densities of the ionosphere. Thus, changes of the characteristic frequencies foE and foF2 may be obtained [10].

References

1. Liperovsky V.A., Pokhotelov O.A., Meister C.-V., Liperovskaya E.V., Physical models of coupling in the lithosphere-atmosphere-ionosphere system before earthquakes, *Geomagnetism and Aeronomy*, Vol.48, No.6, 795-806, 2008.
2. Pulintsev S.A., and Boyarchuk K.A., *Ionospheric precursors of earthquakes*, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2004.
3. Liperovsky V.A., Meister C.-V., Schlegel K., Haldoupis Ch., Currents and turbulence in and near mid-latitude sporadic E-layers caused by strong acoustic impulses, *Ann. Geophysicae*, Vol.15, 767-773. 1997.
4. Meister C.-V., On the physical theory of plasmas in non-equilibrium, post-doctoral thesis, University Rostock, 1995.
5. Koshevaya S.V., Grimalsky V.V., Burlak G.N., Kotsarenko A.N., Acoustic channel of the lithosphere-ionosphere coupling, *Ukr. J. Phys.*, Vol. 47, No. 2, 142-146, 2002.
6. Sturrock P.A., *Plasma physics. An introduction to the theory of astrophysical, geophysical, and laboratory plasmas*, Cambridge University Press, 347 p., 1994
7. Axelsson P., Dispersion relations for waves in anisotropic and stratified magnetoplasmas, *Physics Scripta*, Vol. 57, 242-245, 1998.
8. Шалимов С.Л., Гохберг М.Б. Неоднородности ионосферы сейсмически активных регионов, обусловленные прохождением атмосферных гравитационных волн, генерируемых в эпицентральной зоне//В

сб. "Краткосрочный прогноз катастрофических землетрясений с помощью радиофизических наземно-космических методов". М.: ОИФЗ РАН, 1998. С. 88-98.

9. Гохберг М.Б. Некоторые аспекты акустического воздействия на ионосферу//В сб. "Краткосрочный прогноз катастрофических землетрясений с помощью радиофизических наземно-космических методов". М.: ОИФЗ РАН, 1998. С. 138-141.

10. Liperovskaya E.V., Meister C.-V., Bogdanov V.V., Liperovsky V.A., On the space scales of seismo-ionospheric effects based on data of the critical foF2-frequency observed by the VS-stations Tokyo, Petropavlovsk-Kamchatsky and Tashkent, this volume.

ГЕНЕРАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ТРОПОСФЕРЕ ПЕРЕД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ GENERATION OF ELECTRIC FIELD AND INFRARED RADIATION IN THE TROPOSPHERE BEFORE EARTHQUAKES

В.В. Михайлин¹, В.А. Липеровский², А.С. Силина²,
В.В. Богданов³, К.-В. Мейстер⁴, Е.В. Липеровская²

¹Физический факультет МГУ, г. Москва, Воробьевы горы, д. 1

²ИФЗ РАН, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10

³ИКИР ДВО РАН, Камчатская обл., Елизовский район, с. Паратунка

⁴Технологический Университет, Германия, Дармштадт, Шлоссенгартен штрассе, 9

Some years ago, a model of the generation of local electric fields in the atmosphere a few days before earthquakes and up to a few days after the seismic shock was proposed. The process of the electric fields generation occurs due to increased ionization in the atmosphere at the presence of aerosols. The electric field arises because the larger aerosols which are mainly negatively charged fall down with a larger velocity than the smaller, mainly positively charged aerosols. The ionization in such atmospheric regions is caused by radon, the concentration of which increases in earthquake preparation regions. The formation of mosaic-likely distributed regions of electric fields with intensities of $3 \cdot 10^2$ -- 10^5 V/m, and on the other hand, large areas with increased electrical conductivity should cause a series of physical effects which may be studied using earth-based, atmospheric and satellite observations.

The theoretical analysis of the possible infrared emission spectra showed, that the most important spectral bands, from which information is obtained on electric fields in the night-time ionosphere, possess wavelengths in the interval between $7.0 \mu\text{m}$ and $17.0 \mu\text{m}$. A hypothesis is proposed according to which the infrared emissions are not only connected with the electron acceleration, but also with the heating of the light ions in the electric field.

1. Работы в направлении поиска прогноза землетрясений на основе традиционных сейсмологических методов ведутся уже около 150 лет. Считается, что в принципе проблема долгосрочного прогноза решена. Проблема же оперативного прогноза землетрясений за несколько десятков часов до события была и остается одной из нерешенных проблем. Заметим, что для успешного оперативного прогноза необходимы не только сейсмологические исследования, а всестороннее исследование физики землетрясений и комплекса различных явлений, связанных с подготовкой землетрясения, в частности, вариаций квазистационарного электрического поля, вспышек света и других световых явлений в атмосфере. Эти явления неоднократно наблюдались в ночных условиях перед сильными разрушительными землетрясениями [1, 2, 3]. Однако хорошо наблюдаемые невооруженным глазом световые явления перед землетрясениями бывают достаточно редко – при магнитудах $M > 6$ в 5% случаев [4]. Двадцать лет назад при исследовании со спутников уходящего равновесного инфракрасного излучения над Среднеазиатским регионом на основе анализа ежесуточных ночных космических тепловых снимков в диапазоне 10,5-11,3 мкм в периоды подготовки землетрясений впервые были обнаружены аномалии [5]. Аналогичные наблюдения были и в последние годы [6]. Однако для решения проблемы прогноза землетрясений интересно исследовать спектры инфракрасного **неравновесного** излучения.

Области ионизации в атмосфере над областью подготовки землетрясений можно диагностировать также при помощи радиолокации, анализируя помехи [7, 8]. Вопрос о том, какие физические механизмы приводят к свечению в атмосфере перед землетрясениями, является очень непростым и рассматривался в работе [9], при этом привлекалось несколько гипотез, см. например, [1]. В большинстве гипотез предполагалось, что причиной свечения является аномальное электрическое поле.

Модель генерации квазиоднородного крупномасштабного аномального электрического поля в приземной атмосфере перед землетрясениями развивалась в работах [10, 11, 12, 13]. Эта