

**Метод восстановления характеристик
внутренних атмосферных волн,
обуславливающих наклоны спорадических
плазменных E-слоев в ионосфере Земли**

**Губенко В.Н., Павельев А.Г., Кириллович И.А.,
Губенко Д.В., Андреев В.Е., Губенко Т.В.
ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино, Россия
e-mail: vnkgubenko@gmail.com**

Пятнадцатая Всероссийская открытая конференция
“Современные проблемы дистанционного зондирования
Земли из космоса”

13 - 17 ноября 2017 г. ИКИ РАН, Москва, Россия

Введение: Радиозатменные измерения спутников CHAMP/GPS были использованы нами для исследования спорадических E-слоев в ионосфере Земли. Параметры ионосферных структур определялись на основе анализа высотных вариаций эйконала (фазового пути) и интенсивности радиозатменного сигнала CHAMP, зарегистрированного на GPS-частоте 1575,42 МГц. Данный способ позволяет оценить пространственное смещение плазменного слоя по отношению к перигею зондирующего радиолуча, определить величину угла наклона слоя к локальному горизонту, а также найти высотную поправку его расположения (Pavelyev et al., AMT, 2012; Pavelyev et al., AMT, 2015). Полагая, что внутренняя гравитационная волна (ВГВ) с параллельным плоскости ионизации слоя фазовым фронтом обуславливает угол наклона спорадического E-слоя, мы разработали новый метод определения характеристик ВГВ, связанных с наклонными спорадическими структурами в ионосфере Земли (Gubenko et al., ASR, 2017). Мелкомасштабная внутренняя волна может модулировать первоначально горизонтальный спорадический E-слой по высоте, а также обуславливать вращение вектора градиента плотности плазмы в направлении ее волнового вектора. При восстановлении характеристик ВГВ нами были использованы дисперсионное и поляризационные соотношения для внутренних волн (Gubenko et al., J. Geophys. Res., 2008; Gubenko et al., AMT, 2011; Gubenko et al., Cosmic Res., 2012; Gubenko et al., Cosmic Res., 2015).

Цель работы: Представление нового метода определения характеристик ВГВ, связанных с наклонными спорадическими структурами в ионосфере Земли. Обсуждение результатов восстановления собственной частоты и периода внутренних волн, вертикальной и горизонтальной длины волны, собственной вертикальной и горизонтальной фазовой скорости, а также других волновых параметров.

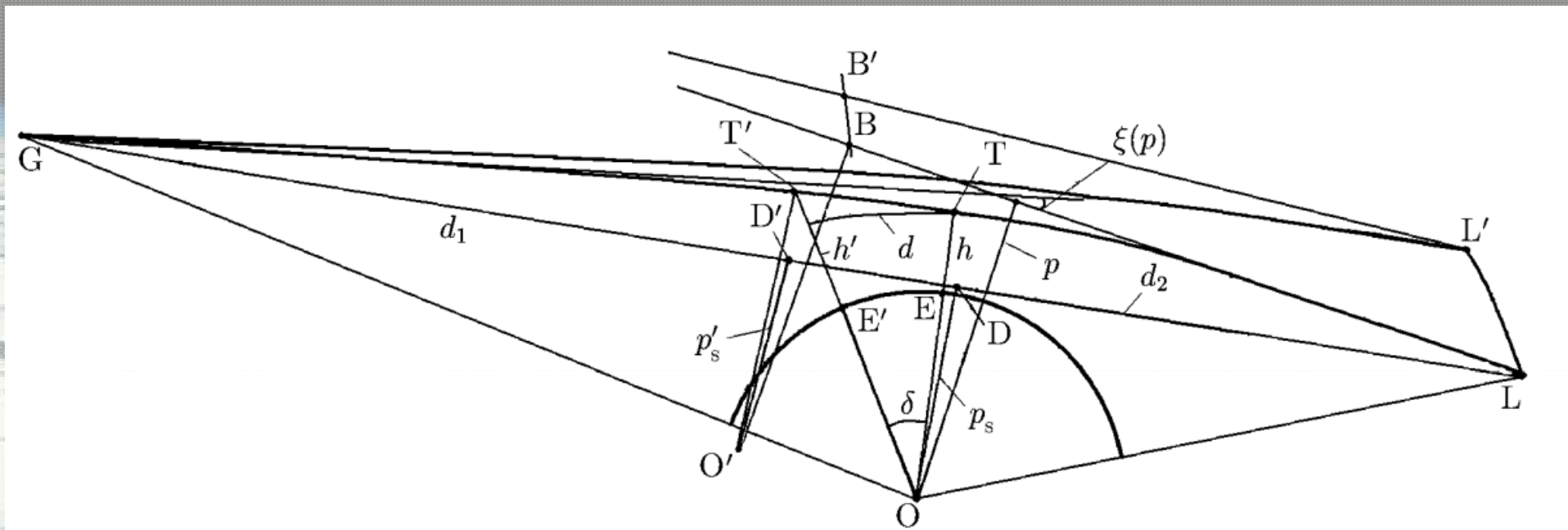


Рис. 1. Схема радиозатменного эксперимента в ионосфере Земли.
 G – геостационарный спутник GPS (высокостабильный передатчик радиосигнала);
 L – низкоорбитальный спутник CHAMP (приемник);
 T – перигей радиолуча;
 GTL – траектория зондирующего луча;
 p и p_s – прицельные параметры для лучевой траектории GTL и линии визирования GL, соответственно;
 d_1 , d_2 и R_0 – расстояния вдоль прямых линий GD, DL и GL, соответственно;
 R_1 и R_2 – расстояния OG и OL, соответственно;
 $\xi(p)$ – угол рефракции радиолуча.

Метод определения положения и наклона плазменного слоя из радиозатменных данных (Gubenko et al., ASR, 2017)

$$1 - X_p(t) = ma, \quad a = d^2 \Phi(t) / dt^2, \quad m = d_1 d_2 / (R_0^{1/2} dp_s / dt)^2, \quad d_1 = R_0 - d_2, \quad (1)$$

где $\Phi(t)$ – эйконал; $X_p(t)$ – оценка рефракционного ослабления из фазовых данных; a – ускорение эйконала.

$$1 - X_p(t) = ma = A_p(t) \operatorname{Re} \exp[j \chi_p(t)], \quad 1 - X_a(t) = ma = A_a(t) \operatorname{Re} \exp[j \chi_a(t)], \quad (4)$$

где $X_a(t) = I / I_0$ – нормированная интенсивность сигнала; $A_p(t)$ и $A_a(t)$ – амплитуды аналитических функций, $\chi_p(t)$ и $\chi_a(t)$ – фазы аналитических функций.

$$d = d'_2 - d_2 = d_2 \frac{A_a - A_p}{A_p}, \quad d_2 = \sqrt{R_2^2 - p_s^2}, \quad (13)$$

где d – смещение тангенциальной точки Т по отношению к перигею луча Т (см. Рис. 1).

$$\delta = d / r_e, \quad \Delta h = d \delta / 2 = d^2 / (2r_e), \quad h' = h + \Delta h, \quad (14)$$

где δ – угол наклона слоя по отношению к локальному горизонту; Δh – высотная поправка к действительной высоте слоя h' ; r_e – ТО (см. Рис. 1); h – высота перигея радиолуча.

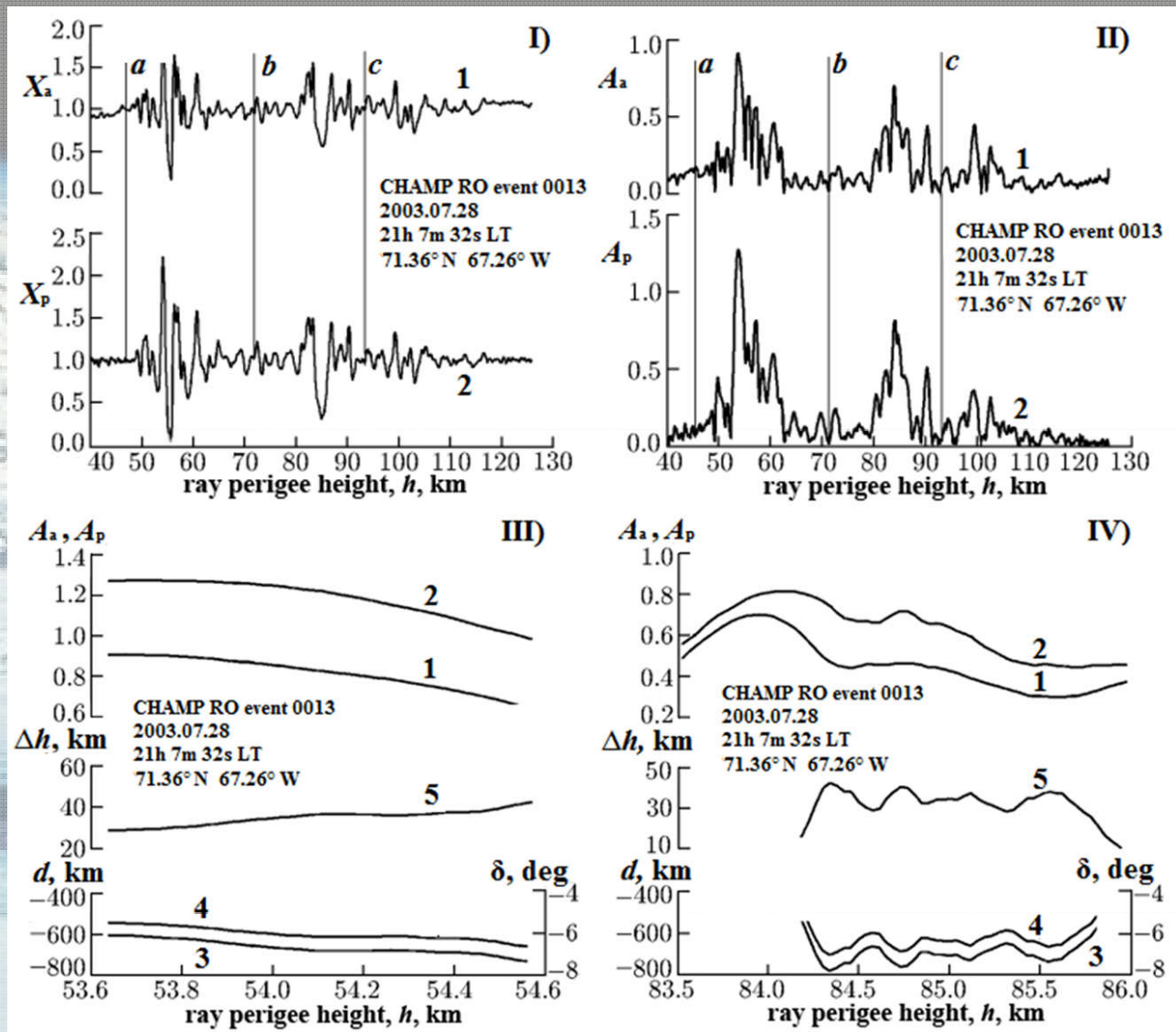


Рис. 2. Сравнение рефракционных ослаблений X_a и X_p , полученных из вариаций интенсивности и эйконала радиозатменного сигнала CHAMP на GPS-частоте $f_1 = 1575.42$ MHz (кривые 1 и 2 на панели I, соответственно). Амплитуды A_a и A_p аналитических сигналов, связанных с вариациями рефракционных ослаблений X_a и X_p (кривые 1 и 2 на панели II, соответственно). Определение положения и наклона для первого слоя путем использования амплитуд A_a и A_p (панель III). Определение положения и наклона для второго слоя на основе амплитуд A_a и A_p (панель IV).

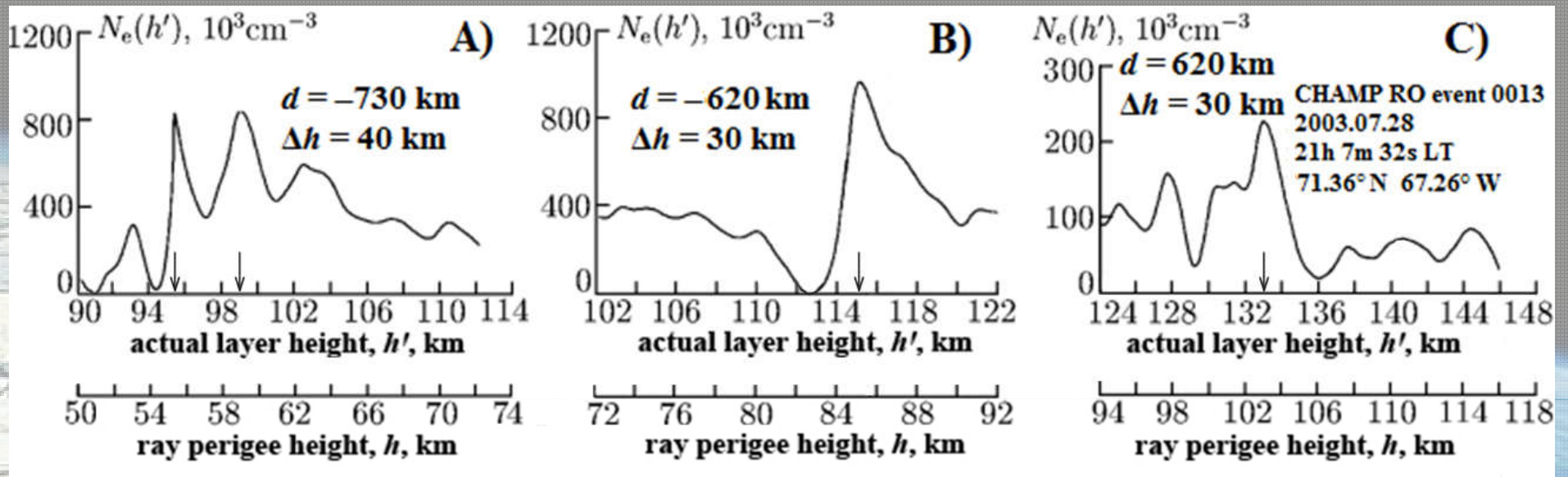


Рис. 3. Результаты определения электронной плотности для трех ионосферных слоев. Смещение, высотная поправка и угол наклона слоя равны, соответственно: $d = -730 \text{ км}$, $\Delta h = 40 \text{ км}$ и $\delta = -7.3^\circ$ (слой *a*, панель А); $d = -620 \text{ км}$, $\Delta h = 30 \text{ км}$ и $\delta = -6.4^\circ$ (слой *b*, панель В); $d = 620 \text{ км}$, $\Delta h = 30 \text{ км}$ и $\delta = 6.4^\circ$ (слой *c*, панель С). Высоты максимумов электронной плотности для слоев *a*, *b* и *c* отмечены стрелками.

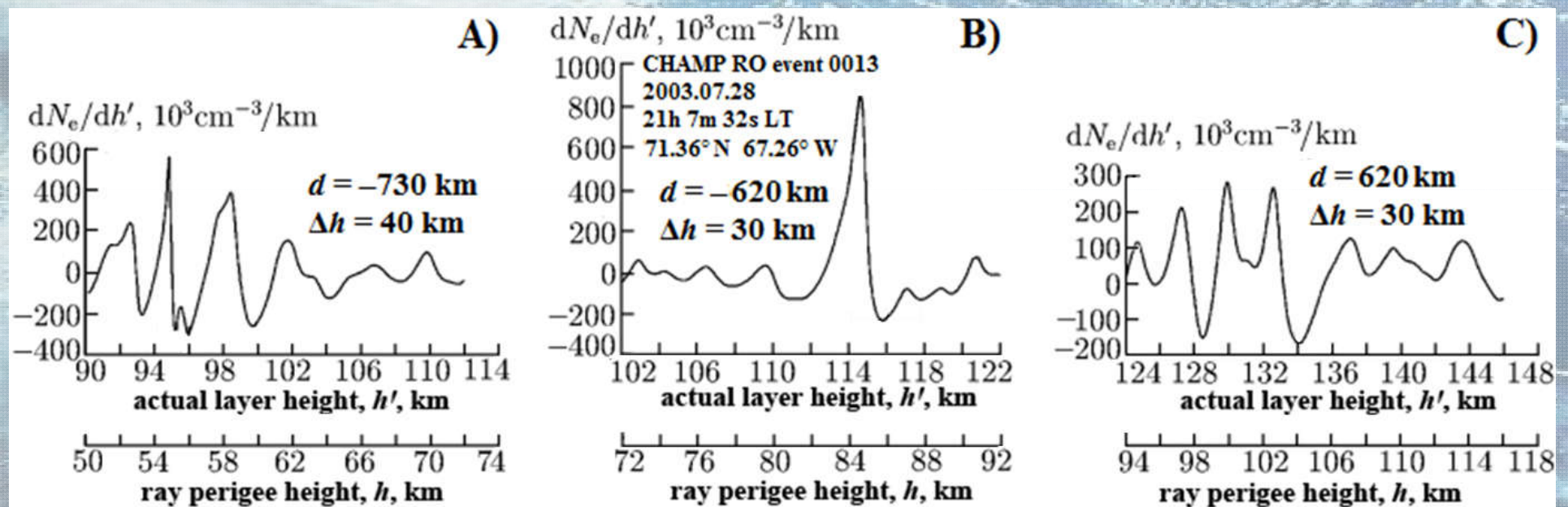


Рис. 4. Результаты определения вертикального градиента для трех ионосферных слоев.

Связь между наклонными плазменными слоями и внутренними волнами (Gubenko et al., ASR, 2017)

Дисперсионное соотношение для гравитационной волны, удовлетворяющей условиям $f^2 < \omega^2 < N_b^2$ и $m^2 \gg 1/(4H^2)$:

$$\frac{\omega^2 - f^2}{N_b^2 - \omega^2} = \frac{k_h^2}{m^2} = \frac{\lambda_z^2}{\lambda_h^2} = \tan^2 \delta, \quad (15)$$

где H – атмосферная шкала высот; N_b – значение невозмущенной частоты Брента-Вяйсяля; f – инерционная частота (параметр Кориолиса); ω – собственная частота ВГВ (частота, наблюдаемая в системе отсчета, которая движется вместе с невозмущенным потоком). Параметры $k_h = 2\pi/\lambda_h$ и $m = 2\pi/\lambda_z$ представляют горизонтальные и вертикальные волновые числа, соответственно. Уравнение (15) можно переписать следующим образом:

$$\omega^2 = \frac{N_b^2 \tan^2 \delta + f^2}{\tan^2 \delta + 1}. \quad (16)$$

С учетом экспериментальных результатов для анализируемых ионосферных слоев ($1 \gg \tan^2 \delta$ и $\omega^2 \gg f^2$) получаем выражение для волновых характеристик:

$$\omega / N_b = \lambda_z / \lambda_h = |\tan \delta|, \quad \tau_i = 2\pi/\omega, \quad (17)$$
$$|c_{ph}^{in}| = \omega / |k_h| = N_b / |m|, \quad |c_{pz}^{in}| = \omega / |m| = N_b |\tan \delta| / |m|,$$

где τ_i – собственный период внутренней волны.

Характеристики внутренних волн, ответственных за наклоны спорадических E-слоев (Gubenko et al., ASR, 2017)

Layer (lower) *a* ($h = 95$ km, $\Delta h = 40$ km): $\lambda_z = 3.0$ km; $\delta = 7.3^\circ$; $|\tan \delta| = 0.13$; $\lambda_h = 23.1$ km; $|c_{ph}^{in}| = 11.0$ m/s; $|c_{pz}^{in}| = 1.4$ m/s; $N_b = 2.3 \cdot 10^{-2}$ rad/s; $\omega = 3.0 \cdot 10^{-3}$ rad/s; $\tau_i = 34.9$ min.

Layer (upper) *a* ($h = 99$ km, $\Delta h = 40$ km): $\lambda_z = 4.4$ km; $\delta = 7.3^\circ$; $|\tan \delta| = 0.13$; $\lambda_h = 33.8$ km; $|c_{ph}^{in}| = 15.4$ m/s; $|c_{pz}^{in}| = 2.0$ m/s; $N_b = 2.2 \cdot 10^{-2}$ rad/s; $\omega = 2.9 \cdot 10^{-3}$ rad/s; $\tau_i = 36.1$ min.

Layer *b* ($h = 115$ km, $\Delta h = 30$ km): $\lambda_z = 4.4$ km; $\delta = 6.4^\circ$; $|\tan \delta| = 0.11$; $\lambda_h = 40.0$ km; $|c_{ph}^{in}| = 14.7$ m/s; $|c_{pz}^{in}| = 1.6$ m/s; $N_b = 2.1 \cdot 10^{-2}$ rad/s; $\omega = 2.3 \cdot 10^{-3}$ rad/s; $\tau_i = 45.5$ min.

Layer *c* ($h = 133$ km, $\Delta h = 30$ km): $\lambda_z = 3.0$ km; $\delta = 6.4^\circ$; $|\tan \delta| = 0.11$; $\lambda_h = 27.3$ km; $|c_{ph}^{in}| = 11.0$ m/s; $|c_{pz}^{in}| = 1.2$ m/s; $N_b = 2.3 \cdot 10^{-2}$ rad/s; $\omega = 2.5 \cdot 10^{-3}$ rad/s; $\tau_i = 41.9$ min.

Заключение: Важно отметить, что в соответствии с уравнением (17) величины собственной частоты и периода могут быть определены на основе частоты Брентя-Вяйсяля и угла между локальной вертикалью и вектором волнового распространения. Найдено, что внутренние волны имеют волновые периоды от 35 до 46 минут и собственные вертикальные фазовые скорости от 1.4 до 2.0 м/с. Эти значения полностью соответствуют периоду ~ 30 минут в системе отсчета земного наблюдателя и направленной вниз скорости ветра ~ 2.0 м/с на высоте около 100 км для модели спорадических E-слоев полярной шапки Земли (McDougall et al., JASTP, 2000). Таким образом, мы разработали новый непрямой метод для определения характеристик внутренних волн, ответственных за наклоны спорадических плазменных E-слоев. *Данная работа была частично поддержана Программой 1.7 Президиума РАН.*

Литература:

- Gubenko, V.N., Pavelyev, A.G., Kirillovich, I.A., Liou, Y.-A. Case study of inclined sporadic E layers in the Earth's ionosphere observed by CHAMP/GPS radio occultations: Coupling between the tilted plasma layers and internal waves. *Advances in Space Research* (available online 13 October 2017), <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.10.001>, 2017.
- Gubenko, V.N., Pavelyev, A.G., Andreev, V.E. Determination of the intrinsic frequency and other wave parameters from a single vertical temperature or density profile measurement. *J. Geophys. Res.* 113, D08109, DOI :10.1029/2007JD008920, 2008.
- Gubenko, V.N., Pavelyev, A.G., Salimzyanov, R.R., Pavelyev, A.A. Reconstruction of internal gravity wave parameters from radio occultation retrievals of vertical temperature profiles in the Earth's atmosphere // *Atmos. Meas. Tech.* 4, 2153–2162, DOI : 10.5194/amt-4-2153-2011, 2011.
- Gubenko, V.N., Pavelyev, A.G., Salimzyanov, R.R., Andreev, V.E. A method for determination of internal gravity wave parameters from a vertical temperature or density profile measurement in the Earth's atmosphere. *Cosmic Res.* 50, 21–31, DOI : 10.1134/S0010952512010029, 2012.
- Gubenko, V.N., Kirillovich, I.A., Pavelyev, A.G. Characteristics of internal waves in the Martian atmosphere obtained on the basis of an analysis of vertical temperature profiles of the Mars Global Surveyor mission. *Cosmic Res.* 53, 133–142, DOI : 10.1134/S0010952515020021, 2015.
- MacDougall, J.W., Plane, J.M.C., Jayachandran, P.T. Polar cap Sporadic-E: part 2, modeling. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 62, 1169–1176, 2000.
- Pavelyev, A.G., Liou, Y.A., Zhang, K., Wang, C.S., Wickert, J., Schmidt, T., Gubenko, V.N., Pavelyev, A.A., Kuleshov, Y. Identification and localization of layers in the ionosphere using the eikonal and amplitude of radio occultation signals. *Atmos. Meas. Tech.* 5, 1–16, DOI : 10.5194/amt-5-1-2012, 2012.
- Pavelyev, A.G., Liou, Y.A., Matyugov, S.S., Pavelyev, A.A., Gubenko, V.N., Zhang, K., Kuleshov, Y. Application of the locality principle to radio occultation studies of the Earth's atmosphere and ionosphere. *Atmos. Meas. Tech.* 8, 2885–2899, DOI: 10.5194/amt-8-2885-2015, 2015.

Спасибо за внимание!