

МОДУЛЯЦИЯ СТРУКТУРЫ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СПОРАДИЧЕСКИХ Е-СЛОЕВ В ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ МЕЛКОМАСШТАБНЫМИ АТМОСФЕРНЫМИ ВОЛНАМИ

В.Н. Губенко, И.А. Кириллович

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино, Россия
sabersecretmail@gmail.com

MODULATION OF THE STRUCTURE OF HORIZONTAL SPORADIC E-LAYERS IN EARTH'S IONOSPHERE BY SMALL-SCALE ATMOSPHERIC WAVES

V.N. Gubenko, I.A. Kirillovich

Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS, Fryazino, Russia
sabersecretmail@gmail.com

Аннотация. Радиозатменные измерения спутника CHAMP (Challenging Minisatellite Payload) были использованы нами для исследования спорадических Е-слоев в ионосфере Земли. Изучение этих тонких слоев повышенной ионизации, расположенных в интервале высот 90–120 км, представляет большой интерес для радиосвязи и навигации. Разработан новый метод определения характеристик внутренних атмосферных волн, базирующийся на использовании наклонных спорадических Е-слоев ионосферы Земли в качестве детектора. Разработанный метод позволяет исследовать связь между мелкомасштабными внутренними волнами и спорадическими Е-слоями в ионосфере Земли и существенно расширяет возможности традиционного радиозатменного мониторинга атмосферы.

Ключевые слова: радиозатменные измерения, атмосфера и ионосфера Земли, наклонные спорадические Е-слои, внутренние атмосферные волны.

Abstract. We used the radio occultation measurements of the satellite CHAMP (Challenging Minisatellite Payload) to investigate sporadic E-layers in the Earth's ionosphere. The study of these thin layers of increased ionization, located in the altitude range of 90–120 km, is of great interest for radio communications and navigation. New method for determining the characteristics of internal atmospheric waves based on the use of inclined sporadic E-layers of the Earth's ionosphere as a detector has been developed. The developed method makes it possible to investigate the coupling the small-scale internal waves and sporadic E-layers in the Earth's ionosphere and significantly expands the capabilities of traditional radio occultation monitoring of the atmosphere.

Keywords: radio occultation measurements, Earth's atmosphere and ionosphere, inclined sporadic E-layers, internal atmospheric waves.

ВВЕДЕНИЕ

Спорадические Е-слои (E_s) известны как тонкие слои повышенной ионизации на высотах от 90 до 120 км в ионосфере Земли. Исследование эффектов, связанных с E_s -структурами, представляет большой интерес для радиосвязи и навигации. Теория формирования спорадических Е-слоев с помощью ветрового сдвига в средних широтах была подтверждена многими исследованиями [Whitehead, 1989]. Было установлено, что E_s -слои в средних широтах являются очень тонкими (их толщина составляет несколько сот метров), распределенными по горизонтали на сотни километров, плотными (концентрация частиц достигает нескольких единиц от 10^6 электронов/ионов на $см^3$) и состоящими из металлических атомов [Kirkwood, Nilsson, 2000]. При наличии наклонных геомагнитных полей, слияние ионов в Е-области ионосферы может быть обусловлено сдвигом как зонального, так и меридионального ветра. Однако, основным драйвером ионной конвергенции в средних широтах на высотах ~115 км и ниже рассматривается сдвиг зонального ветра [Haldoupris, 2012].

Механизм формирования E_s -слоев в высоких широтах ($>60^\circ$) с помощью ветрового сдвига не будет столь же эффективным как в средних широтах из-за того, что тут магнитное поле направлено почти вертикально к локальному горизонту. Крупномасштабная горизонтальная структура плазмы в Е-области авроры определяется пространственным рас-

пределением источников солнечной радиации и осадков частиц. В высоких широтах, внутренние атмосферные волны менее важны в качестве механизма вертикального структурирования слоев вследствие большого угла наклона ($\sim 90^\circ$) магнитного поля к локальному горизонту [Kelley, 2009]. Тем не менее, малый угол отклонения магнитного поля от вертикали очень существенен вследствие больших электрических полей, направленных перпендикулярно магнитному полю. Здесь конвективные электрические поля являются важными драйверами конвергенции/дивергенции движения ионов [Kirkwood, Nilsson, 2000].

Целью работы является: (I) наблюдения с помощью радиозатменных данных CHAMP спорадических Е-слоев и определение их локализации и наклона в высокоширотной ионосфере Земли; (II) представление метода определения характеристик ВГВ, модулирующих исследуемые E_s -слои и обуславливающих их наклоны.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ СПОРАДИЧЕСКИХ Е-СЛОЕВ И ИХ НАКЛОНА К ЛОКАЛЬНОМУ ГОРИЗОНТУ ПО РАДИОЗАТМЕННЫМ ДАННЫМ

Схема радиозатменного эксперимента показана на рис. 1. Высокостабильные радиосигналы, излучаемые передатчиком, расположенным на геостационарном спутнике G, проходят через ионосферу и атмо-

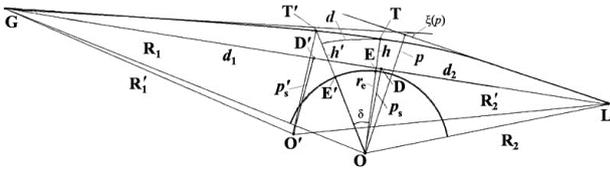


Рис. 1. Схема радиозатменного эксперимента в ионосфере Земли

феру вдоль луча GTL и регистрируются приемником на борту низкоорбитального спутника L. Измерения амплитуды сигнала $A(t)$ и набега фазового пути (эйконала) $\Phi(t)$ проводятся на несущей частоте как функции времени t . Глобальная сферическая симметрия ионосферы и атмосферы с общим центром (точка O на рис. 1) является ключевым предположением при анализе радиозатменных данных.

G — геостационарный спутник GPS (высокостабильный передатчик радиосигнала); L — низкоорбитальный спутник CHAMP (приемник); GTL — траектория зондирующего луча; T — перигей радиолуча; $h = TE$ — высота перигея луча; $\xi(p)$ — угол рефракции радиолуча; p и $p_s = OD$ — прицельные параметры для лучевой траектории GTL и линии визирования GDL, соответственно; d_1, d_2 и R_0 — расстояния GD, DL и GL, соответственно; R_1 и R_2 — расстояния OG и OL, соответственно; $h' = TE'$ — фактическая высота слоя; δ — угол наклона слоя к локальному горизонту.

Радиозатменные измерения спутника CHAMP были использованы для исследования спорадических E-слоев в ионосфере Земли. На рис. 2 представлены результаты определения положения и наклона ионосферных слоев по данным обработки радиосигналов на GPS-частоте 1575.42 МГц (сеанс 4 июля 2003 г., 2 ч 27 мин UT; координаты перигея луча 68.5° N, 82.8° W). Параметры ионосферных структур определялись нами на основе анализа высотных вариаций фазового пути (эйконала) и интенсивности радиозатменного сигнала. Это позволило оценить пространственное смещение d плазменных структур по отношению к перигею радиолуча, определить величины углов наклона δ слоев к локальному горизонту, а также найти высоты h' истинного расположения слоев [Gubenko et al., 2018].

Рефракционные ослабления радиозатменных сигналов $X_a(h)$ и $X_p(h)$, полученные на основе вариаций интенсивности и эйконала, представлены на рис. 2-I как функции высоты перигея h луча. В высотных интервалах 50–60 км и 75–85 км вариации $X_a(h)$ и $X_p(h)$ сильно коррелированы между собой и они могут рассматриваться как когерентные осцилляции, обусловленные влиянием спорадических слоев (рис. 2-I, кривые 1 и 2). Амплитуды A_a и A_p аналитических сигналов, связанные с ослаблениями $X_a(h)$ и $X_p(h)$, вычислялись с помощью преобразования Гильберта и показаны на рис. 2-II (кривые 1 и 2, соответственно).

Смещение d для спорадического E-слоя, отнесенного к высоте перигея луча 51 км, показано на рис. 2-III (кривая 3). Значения d сосредоточены в диапазоне от -900 до -950 км, а угол наклона этого плазменного слоя к локальной горизонтали оказался равен $\delta = -8.2 \pm 1.2^\circ$. Для другого слоя указанный угол наклона составляет $\delta = -5.0 \pm 0.8^\circ$.

МОДУЛЯЦИЯ СТРУКТУРЫ СПОРАДИЧЕСКИХ E-СЛОЕВ ВНУТРЕННИМИ АТМОСФЕРНЫМИ ВОЛНАМИ

Распространение внутренней атмосферной волны модулирует структуру изначально горизонтального спорадического E-слоя и приводит к вращению градиента плотности плазмы в направлении ее волнового вектора. На основе того, что внутренняя гравитационная волна (ВГВ) обуславливает угол наклона спорадического E-слоя, поворачивая плоскость ионизации слоя параллельно ее фазовому фронту, мы разработали новый метод определения характеристик внутренних атмосферных волн, связанных с наклонными спорадическими структурами в ионосфере Земли. При восстановлении параметров ВГВ использовались базовые выражения (дисперсионное уравнение, поляризационные соотношения связи, определения волновых характеристик) для внутренних гравитационных волн [Gubenko et al., 2008, 2011; Губенко, Кириллович, 2018; Губенко и др., 2012, 2015, 2016а, б]. Этот метод позволяет исследовать взаимосвязи между мелкомасштабными внутренними волнами и спорадическими E-слоями в ионосфере Земли и существенно расширяет возможности традиционного радиозатменного мониторинга атмосферы.

Идея экспериментального определения характеристик внутренней атмосферной волны, связанной с наклонными плазменными структурами, заключается в следующем. Распространяющаяся через E-область мелкомасштабная внутренняя волна обуславливает наклон спорадического E-слоя, разворачивая его плоскость ионизации параллельно фазовому фронту внутренней волны. В этом случае угол δ между вектором распространения волны и локальной вертикалью будет совпадать с углом наклона исследуемого плазменного E-слоя. На основе соотношений, полученных в работе [Gubenko et al., 2018], находим характеристики внутренних атмосферных волн, которые обуславливают наклоны изначально горизонтальных спорадических E-слоев в ионосфере Земли (сеанс 0026 измерений):

Слой a

$$(h' = 114 \text{ км}, \Delta h = 63 \text{ км}): \lambda_z = 2.5 \text{ км};$$

$$\delta = -8.2^\circ; |\tan \delta| = 0.14; \lambda_h = 17.9 \text{ км};$$

$$\left| c_{ph}^{in} \right| = 8.2 \text{ м/с}; \left| c_{pz}^{in} \right| = 1.2 \text{ м/с}; N_b = 2.1 \cdot 10^{-2} \text{ рад/с};$$

$$\omega = 2.9 \cdot 10^{-3} \text{ рад/с}; \tau_1 = 36.1 \text{ мин}$$

Слой b

$$(h' = 99 \text{ км}, \Delta h = 24 \text{ км}): \lambda_z = 2.0 \text{ км}; \delta = -5.0^\circ;$$

$$|\tan \delta| = 0.09; \lambda_h = 23.0 \text{ км}; \left| c_{ph}^{in} \right| = 7.4 \text{ м/с};$$

$$\left| c_{pz}^{in} \right| = 0.6 \text{ м/с}; N_b = 2.2 \cdot 10^{-2} \text{ рад/с}; \omega = 2.0 \cdot 10^{-3} \text{ рад/с};$$

$$\tau_1 = 52.3 \text{ мин}$$

Восстановленные нами значения характеристик мелкомасштабных внутренних волн, модулирующих спорадические E-слои, хорошо согласуются с результатами независимых исследований и данными моделирования высокоширотной ионосферы Земли [MacDougall et al., 2000a, б].

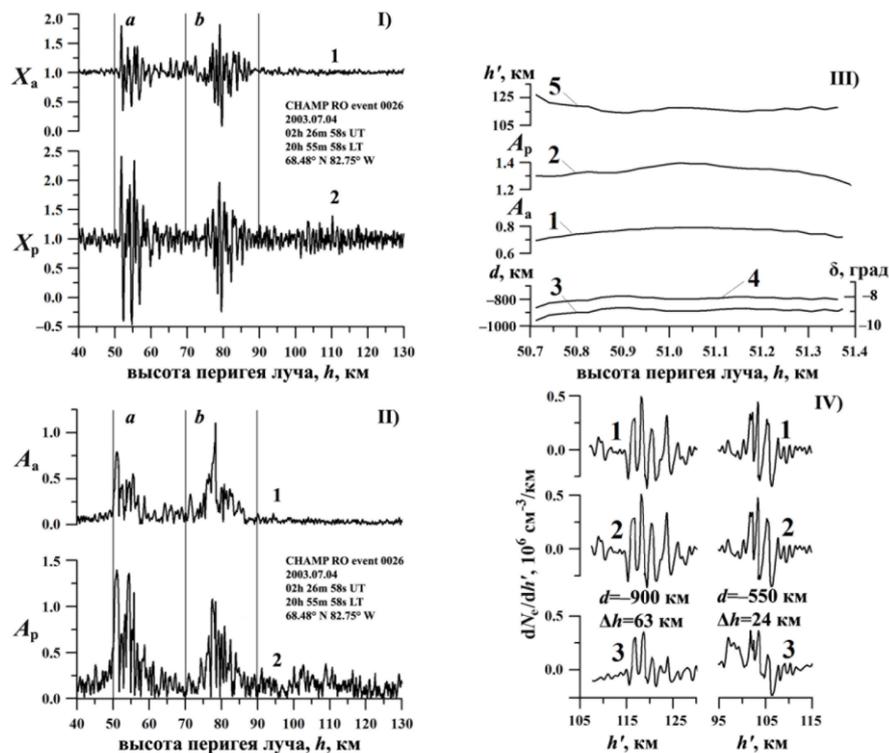


Рис. 2. Сравнение рефракционных ослаблений X_a и X_p , полученных из вариаций интенсивности и эйконала радиозатменного сигнала CHAMP на GPS-частоте $f_1=1575.42$ МГц (кривые 1 и 2 на панели I, соответственно) в сеансе 0026 измерений. Амплитуды A_a и A_p аналитических сигналов, связанные с вариациями рефракционных ослаблений X_a и X_p (кривые 1 и 2 на панели II, соответственно). Определение положения, фактической высоты и угла наклона первого (а) слоя (панель III) путем использования амплитуд A_a и A_p аналитических сигналов. Высотные профили вертикального градиента электронной плотности для двух слоев (панель IV)

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Программы 12 Президиума РАН и гранта РФФИ № 19-02-00083 А.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Губенко В.Н., Павельев А.Г., Салимзянов Р.Р., Андреев В.Е. Методика определения параметров внутренней гравитационной волны по измерению вертикального профиля температуры или плотности в атмосфере Земли // *Космические исследования*. 2012. Т. 50, № 1. С. 23–34.

Губенко В.Н., Кириллович И.А., Павельев А.Г. Характеристики внутренних волн в атмосфере Марса, полученные на основе анализа вертикальных профилей температуры миссии Mars Global Surveyor // *Космические исследования*. 2015. Т. 53, № 2. С. 141–151. DOI: [10.7868/S0023420615020028](https://doi.org/10.7868/S0023420615020028).

Губенко В.Н., Кириллович И.А., Павельев А.Г., Андреев В.Е. Обнаружение насыщенных внутренних гравитационных волн и реконструкция их характеристик в атмосфере Марса // *Известия ВУЗов. Физика*. 2016а. Т. 59, № 12-2. С. 46–49.

Губенко В.Н., Кириллович И.А., Лиу Й.-А., Павельев А.Г. Мониторинг активности внутренних гравитационных волн в атмосфере Арктики и Антарктики // *Известия ВУЗов. Физика*. 2016б. Т. 59, № 12-3. С. 80–85.

Губенко В.Н., Кириллович И.А. Диагностика насыщения внутренних атмосферных волн и определение их характеристик в стратосфере Земли с помощью радиозондовых измерений // *Солнечно-земная физика*. 2018. Т. 4, № 2. С. 76–85. DOI: [10.12737/szf-42201807](https://doi.org/10.12737/szf-42201807).

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.* 2008. V. 113. D08109. DOI: [10.1029/2007JD008920](https://doi.org/10.1029/2007JD008920).

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 // *Adv. Space Res.* 2018. V. 61, N 7. P. 1702–1716. DOI: [10.1016/j.asr.2017.10.001](https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.10.001).

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.* 2011. V. 4, N 10. P. 2153–2162. DOI: [10.5194/amt-4-2153-2011](https://doi.org/10.5194/amt-4-2153-2011).

Haldoupis C. Midlatitude Sporadic E layers. A typical paradigm of atmosphere–ionosphere coupling // *Space Sci. Rev.* 2012. V. 168. P. 441–461.

Kelley M.C. *The Earth's Ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics*. Second Edition. Academic Press. San Diego. California. 2009. 556 pp.

Kirkwood S., Nilsson H. High-latitude sporadic-E and other thin layers – the role of magnetospheric electric fields // *Space Sci. Rev.* 2000. V. 91. P. 579–613.

MacDougall J.W., Jayachandran P.T., Plane J.M.C. Polar cap Sporadic-E: part 1, observations // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2000a. V. 62. P. 1155–1167.

MacDougall J.W., Plane J.M.C., Jayachandran P.T. Polar cap Sporadic-E: part 2, modeling // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2000b. V. 62. P. 1169–1176.

Whitehead J.D. Recent work on midlatitude and equatorial sporadic E // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1989. V. 51. P. 401–424. DOI: [10.1016/0021-9169\(89\)90122-0](https://doi.org/10.1016/0021-9169(89)90122-0).