

Наблюдения спорадических E-слоев в ионосфере Земли по данным анализа радиозатменных измерений спутников CHAMP/GPS и COSMIC/GPS

В.Н. Губенко, И.А. Кириллович, В.Е. Андреев, Т.В. Губенко, А.А. Павельев

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Московская область, 141190 Фрязино, пл. Введенского, дом 1, E-mail: gubenko@fireras.su,
vn.gubenko@gmail.com.

Представлены вертикальные распределения спорадических E-слоев в ионосфере Земли, полученные на основе обработки изменений эйконала (набега фазового пути) и амплитуды радиозатменных сигналов, зарегистрированных с помощью спутников CHAMP/GPS и COSMIC/GPS. Проанализированы типы спорадических структур (дискретные и двойные слои), наблюдаемых в радиозатменных экспериментах. Рассмотрены механизмы формирования спорадических E-слоев (вертикальный сдвиг скорости ветра и выпадение частиц) в ионосфере планеты.

The vertical distributions of sporadic E-layers in the Earth's ionosphere based on processing the eikonal (phase path excess) and amplitude variations of radio occultation signals recorded by using the CHAMP/GPS and COSMIC/GPS satellites have been presented. The types of sporadic structures (discrete and double layers) observed in radio occultation experiments have been analyzed. The formation mechanisms of sporadic E-layers (vertical shear of wind speed and particle precipitation) in the planet's ionosphere have been considered.

Введение

Спорадические E-слои (E_s) представляют собой тонкие слои повышенной ионизации на высотах от 90 до 130 км в ионосфере Земли. Исследование эффектов, связанных с E_s -структурами, актуально для обеспечения бесперебойной работы систем радиосвязи и навигации. Анализируя радиозатменные измерения CHAMP (Challenging Minisatellite Payload), авторы работы [1] изучили глобальную морфологию спорадических E-слоев. Климатология E_s -слоев была исследована ими на основе определения дисперсий SNR (signal to noise ratio) и фазы в терминах месячных зональных средних, сезонных карт, суточных и долговременных вариаций [1]. Подробный анализ глобального распределения появления E_s -слоев был выполнен в работе [2]. Здесь, для исследования мелкомасштабных неоднородностей в ионосфере Земли, была использована обработка большой базы радиозатменных измерений (миссии CHAMP, GRACE и FORMOSAT-3/COSMIC), проведенных в период с января 2002 по декабрь 2007 года. Было показано, что распределение появления E_s -слоев в средних широтах демонстрирует сильные колебания, причем самые высокие частоты их появления наблюдаются в течение летнего времени. Максимумы появления слоистых неоднородностей возникают в интервале геомагнитных широт от 10° до 60° среднеширотной ионосферы Земли. В высоких широтах, где углы магнитного наклона составляют от 70° до 80° , в указанном распределении присутствуют глубокие минимумы, что согласуется с теорией формирования спорадических слоев с помощью ветрового сдвига [2, 3].

Теория формирования E_s -слоев с помощью ветрового сдвига в средних широтах подтверждена многими исследованиями [4]. Было установлено, что E_s -слои в средних широтах являются очень тонкими (их толщина составляет несколько сотен метров), распределенными по горизонтали на сотни километров, плотными (концентрация достигает нескольких единиц ($\times 10^6 \text{ см}^{-3}$)) и состоящими из атомов металлов [5]. При наличии наклонных геомагнитных полей слияние ионов в E-области ионосферы может быть обусловлено вертикальным сдвигом как зонального, так и меридионального ветра. Однако, именно сдвиг зональной скорости ветра рассматривается в качестве основного драйвера ионной конвергенции в средних широтах (высоты ~ 115 км и ниже) [6].

В высоких широтах ($>60^\circ$) магнитное поле направлено почти вертикально к локальному горизонту и механизм формирования E_s -слоев с помощью ветрового сдвига не будет столь эффективным как в средних широтах. Крупномасштабная горизонтальная структура плазмы в авроральной E -области определяется пространственным распределением источников солнечной радиации и осадков частиц. Внутренние атмосферные волны в высоких широтах менее важны в качестве механизма вертикального структурирования слоев вследствие большого угла наклона ($\sim 90^\circ$) магнитного поля к локальному горизонту [7]. Тем не менее, малый угол отклонения магнитного поля от вертикали здесь очень существенен вследствие больших электрических полей, направленных перпендикулярно магнитному полю. В высоких широтах конвективные электрические поля являются важными драйверами ионной конвергенции. Авторы работы [8] впервые предположили, что E_s -слои могут быть сформированы в результате воздействия только электрического поля в высоких широтах, где механизм ветрового сдвига практически не работает, в частности на высотах ниже 110 км. Электрическое поле в авроральной зоне и в полярной шапке заметно больше, чем в экваториальной области, и более широко распределено по площади. Среднее электрическое поле в зоне авроры имеет сильную суточную компоненту с амплитудой 30 мВ/м и максимумами, расположенными вблизи 05:00 и 18:00 LT. Напряженность поля ~ 50 мВ/м является обычной как для аврорального овала, так и для полярной шапки.

Установлено, что приливные ветры (полусуточная и суточная моды) оказывают заметное влияние на образование спорадических E -слоев в высоких широтах (электрические поля не учитываются), однако внутренние атмосферные волны также могут создавать дополнительные ветровые узлы [9]. Результаты работы [10] свидетельствуют, что здесь часто наблюдаются E_s -слои с плотностью $\sim 3 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ и имеется достаточное количество ионов Na^+ для получения измеренных в экспериментах плотностей атомов Na. Состав ионов металлов в E_s -слоях предполагает их связь с процессами абляции метеоров, а также с формированием слоев нейтральных атомов металлов в верхней мезосфере [11–13]. Предполагается, что высокоширотные E_s -слои являются проявлением авроры, которая представляет собой мощный источник повышенной ионизации. Однако в этом случае спорадические слои не будут очень тонкими. Согласно результатам работы [5], в высоких широтах наблюдается несколько типов спорадических слоев, которые намного тоньше образованных с помощью авроральных осадков и, вероятно, сформированы способами, характерными для формирования E_s -слоев в средних широтах.

Целью работы является наблюдение спорадических E -слоев с помощью спутников CHAMP/GPS и COSMIC/GPS, определение и анализ высотных зависимостей их интенсивности в ионосфере Земли.

Анализ радиозатменных данных спутников CHAMP/GPS и COSMIC/GPS в ионосфере Земли.

Высокостабильные сигналы, синхронизированные атомными стандартами частоты и излучаемые навигационными спутниками GPS и ГЛОНАСС, создают на высотах ниже ~ 20 тыс. км глобальные радиополя, необходимые для задач навигации, наведения, определения местоположения и других целей. Эти сигналы можно использовать, с одной стороны, для глобального мониторинга естественных процессов, происходящих в магнитосфере, ионосфере и нейтральной атмосфере Земли, и, с другой стороны, для изучения эффектов и условий распространения радиоволн (дифракции, рефракции, поглощения и рассеяния в атмосфере, отражения от поверхности суши и океана). В радиозатменном методе используются радиосигналы с несущими частотами

$f_1 = 1575.42$ МГц и $f_2 = 1227.60$ МГц, излучаемые навигационными спутниками и принимаемые низкоорбитальными (COSMIC, CHAMP и др.) аппаратами с целью дистанционного зондирования ионосферы и атмосферы планеты.

Принято считать, что в обычных условиях ионосфера Земли вносит малый вклад в изменение амплитуды сигналов, регистрируемых в радиозатменных экспериментах. Возмущенная ионосфера может значительно влиять на характеристики радиоволн. Сильные амплитудные и фазовые вариации сигналов систематически наблюдаются в интервале высот перигея луча от 30 до 85 км, расположенного выше основной части нейтральной атмосферы и ниже E-слоя ионосферы. Ранее в радиозатменных экспериментах высота расположения спорадических E-слоев принималась равной высоте перигея лучевой линии. Однако, это предположение может нарушаться при наличии горизонтальных градиентов в ионосфере. В работах [14, 15] показано, что упомянутые выше возмущения амплитуды и фазы радиоволн, наблюдаемые при низких высотах перигея луча, объясняются влиянием наклонных плазменных структур, расположенных существенно выше в ионосфере. Данные об амплитудных и фазовых вариациях сигналов на низких высотах являются дополнительным источником информации для дистанционного зондирования ионосферы Земли, которое включает детектирование внутренних гравитационных волн и определение их характеристик на ионосферных высотах [16, 17].

На рис. 1 приведены зависимости нормированной амплитуды A радиозатменного сигнала от высоты перигея луча h , полученные с помощью спутников COSMIC на несущей GPS-частоте $f_1 = 1575.42$ МГц при зондировании четырех районов высокоширотной ионосферы Северного полушария Земли. Вблизи каждой кривой (1–4) указано время проведения сеанса измерений и даны координаты (широта, долгота) зондируемого района ионосферы. Для вертикальных профилей $A(h)$ на рис. 1 характерны особенности, сопровождающиеся всплеском амплитуды, затем провалом с последующим всплеском. Такие структуры наблюдаются на разных уровнях в интервале высот перигея луча ~ 88 –110 км. Отметим, что представленные на рис. 1 зависимости 1, 3 и 4 имеют типичную U-образную форму и полностью соответствуют результатам радиозатменного зондирования спутником CHAMP дискретных (отдельных) E_s-слоев в высокоширотной ионосфере Земли [16, 17]. В случае, когда вектор распространения радиоволн параллелен плоскости ионизации E_s-слоя, прохождение радиолучами центральной части слоя (пик электронной плотности) приводит к сильной дефокусировке, а его краев – к фокусировке лучей. Осцилляции, наблюдаемые ниже области дефокусировки (кривая 4 на рис. 1), могут быть обусловлены интерференцией прямого и преломленного радиолучей при прохождении нижней границы слоя [18]. В то же время, кривая 2 на рис. 1 демонстрирует более сложную (двойную) квазипериодическую структуру соответствующего спорадического E-слоя по сравнению с дискретными слоями, рассмотренными нами ранее (кривые 1, 3 и 4).

Важно отметить, что положение слоя по вертикали не всегда однозначно определяется высотой перигея луча h . Два слоя с одинаковой высотой перигея луча h , но разными смещениями относительно перигея луча будут иметь неодинаковые фактические высоты их расположения [16, 17]. Поэтому фактическая высота слоя является более подходящим параметром для описания высотного положения слоя, чем высота перигея луча. В качестве примера, иллюстрирующего способ определения положения плазменных слоев, рассмотрим радиозатменные данные, полученные с помощью спутника CHAMP в южной приэкваториальной атмосфере Земли, в которых имеются сильные квазирегулярные амплитудные и фазовые вариации сигнала.

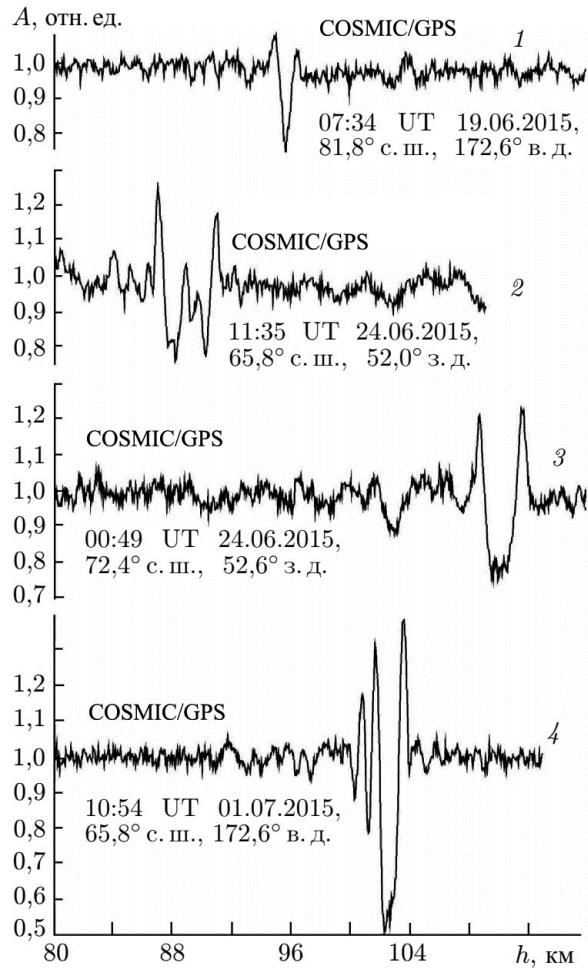


Рис. 1. Зависимости нормированной амплитуды A радиозатменного сигнала от высоты перигея луча h , полученные с помощью спутников COSMIC/GPS при зондировании четырех районов высокоширотной ионосферы Северного полушария Земли.

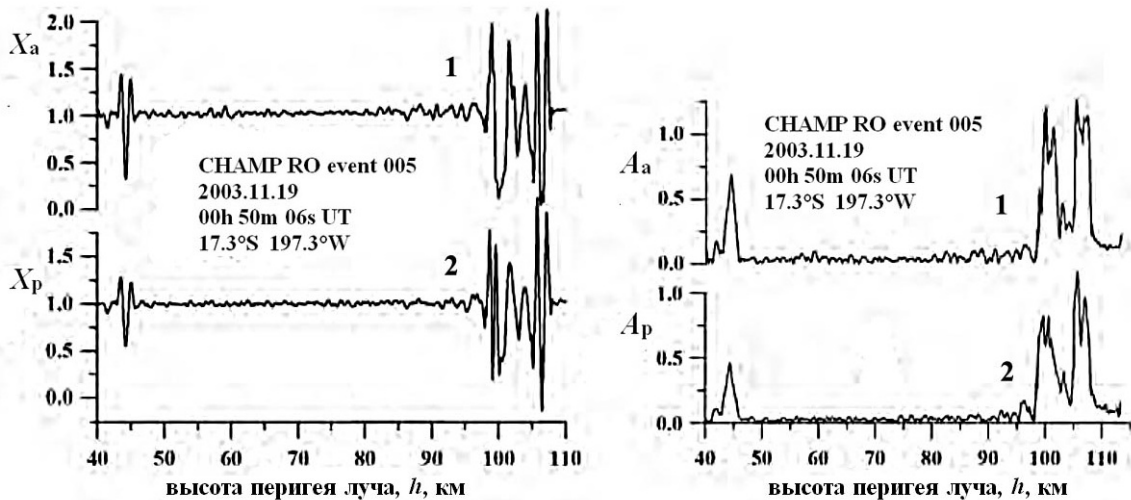


Рис. 2. Вертикальные профили X_a и X_p рефракционного ослабления, найденные из радиозатменных данных CHAMP/GPS об амплитуде (кривая 1) и эйконе (кривая 2) сигнала на несущей частоте $f_1 = 1575.42$ МГц. Справа показаны соответствующие амплитуды A_a и A_p аналитических сигналов $(X_a - 1)$ и $(X_p - 1)$.

На рис. 2 показаны вертикальные профили рефракционного ослабления радиоволн X_a и X_p (левая панель) и соответствующих амплитуд A_a и A_p (правая панель) аналитических сигналов (X_a-1) и (X_p-1) , которые были получены в результате обработки экспериментальных данных. Рефракционное ослабление X_a определялось с помощью измерений амплитуды радиозатменного сигнала спутника CHAMP, усредненных на интервале 0.5 сек. Рефракционное ослабление X_p было найдено на основе обработки данных об эйконе сигналу на несущей GPS-частоте $f_1 = 1575.42$ МГц. На высотных интервалах 42–46 км и 96–106 км вариации рефракционных ослаблений X_a и X_p имеют сильную связь и могут рассматриваться как когерентные изменения амплитуды и фазы сигнала, вызванные спорадическими слоями (рис. 2, левая панель). Амплитуды A_a и A_p аналитических сигналов (X_a-1) и (X_p-1) были вычислены с помощью численного преобразования Гильберта. Значения A_a и A_p показаны на правой панели рис. 2. В интервале высот 42–46 км, амплитуды A_a и A_p изменяются практически синфазно, однако величина A_a примерно в 1.5 раза больше A_p . Это означает, что плазменный спорадический слой в интервале 42–46 км смещен относительно перигея луча ближе к навигационному спутнику. При этом, фактическая высота его расположения оказывается заметно больше высоты перигея луча [16, 17].

Таким образом, нами представлены высотные распределения спорадических E-слоев, полученные на основе обработки измерений амплитуды и эйконала радиозатменных сигналов в ионосфере Земли, зарегистрированных с помощью спутников CHAMP/GPS и COSMIC/GPS. Проанализированы типы E_s -структур (дискретные и двойные слои), наблюдаемых в радиозатменных экспериментах, рассмотрены механизмы формирования спорадических E-слоев (вертикальный сдвиг скорости ветра и высыпание частиц) в ионосфере высоких и средних широт планеты.

Работа выполнена в рамках государственного задания и частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект РФФИ № 19-02-00083 А) и Программой № 12 Президиума РАН.

Литература

1. Wu D.L., Ao C.O., Hajj G.A., et al. Sporadic E morphology from GPS-CHAMP radio occultations // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. A01306. doi: 10.1029/2004JA010701.
2. Arras C., Wickert J., Beyerle G., et al. A global climatology of ionospheric irregularities derived from GPS radio occultation // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35. L14809. doi: 10.1029/2008GL03415.
3. Haldoupis C.A. Tutorial review on sporadic E layers // *Aeronomy of the Earth's Atmosphere and Ionosphere*. Berlin. Springer. 2011. P. 381–394. (IAGA Special Sopron Book Series 2). doi: 10.1007/978-94-007-0326-1-2.
4. 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.
5. 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. doi: 10.1023/A:1005241931650.
6. Haldoupis C. Midlatitude sporadic E layers. A typical paradigm of atmosphere–ionosphere coupling // *Space Sci. Rev.* 2012. V. 168. P. 441–461. doi: 10.1007/s11214-011-9786-8.
7. Kelley M.C. *The Earth's Ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics*. Second Edition. Academic Press. San Diego, California. 2009. 556 p.
8. Nygren T., Jalonen L., Oksman J., Turunen T. The role of electric field and neutral wind direction in the formation of sporadic E-layers // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1984. V. 46. P. 373–381.
9. Turunen T., Nygren T., Huuskonen A. Nocturnal high-latitude E-region in winter during extremely quiet conditions // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1993. V. 55. P. 783–795.

10. Cox R.M., Plane J.M.C. An ion-molecule mechanism for the formation of neutral sporadic Na layers // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. D6. P. 6349–6359. doi: 10.1029/97JD03376.
11. Kirkwood S., von Zahn U. On the role of auroral electric fields in the formation of low altitude sporadic-E and sudden sodium layers // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1991. V. 53. P. 389–407.
12. Kirkwood S., von Zahn U. Formation mechanisms for lowaltitude Es and their relationship with neutral Fe layers: Results from the METAL campaign // *J. Geophys. Res.* 1993. V. 98. P. 21549–21561.
13. Heinselman C.J., Thayer J.P., Watkins B.J. A high-latitude observation of sporadic sodium and sporadic E-layer formation // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25. P. 3059–3062. doi: 10.1029/98GL02215.
14. 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.* 2012. V. 5. No. 1. P. 1–16. doi: 10.5194/amt-5-1-2012.
15. 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.* 2015. V. 8. No. 7. P. 2885–2899. doi: 10.5194/amt-8-2885-2015.
16. 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. No. 7. P. 1702–1716. doi: 10.1016/j.asr.2017.10.001.
17. Губенко В.Н., Кириллович И.А. Модуляция спорадических E-слоев мелкомасштабными атмосферными волнами в высокоширотной ионосфере Земли // *Солнечно-земная физика.* 2019. Т. 5. № 3. С. 116–129. doi: 10.12737/szf-53201912.
18. Zeng Z., Sokolovskiy S. Effect of sporadic E cloud on GPS radio occultation signal // *Geophys. Res. Lett.* 2010. V. 37. L18817. doi: 10.1029/2010GL044561.