МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВНУТРЕННИХ ВОЛН В НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ ПО ДАННЫМ АНАЛИЗА РАДИОЗАТМЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

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

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

Спорадические E-слои представляют собой тонкие слои повышенной ионизации на высотах от 90 до 130 км в нижней ионосфере Земли. Распространение внутренней гравитационной волны (ВГВ) модулирует структуру изначально горизонтального спорадического E-слоя, что приводит к наклону указанного слоя относительно плоскости локального горизонта. На основе того факта, что ВГВ обусловливает угол наклона спорадического E-слоя, разворачивая плоскость ионизации слоя параллельно ее фазовому фронту, нами разработан метод определения характеристик внутренних атмосферных волн на ионосферных высотах. Данный метод позволяет изучать взаимосвязи между внутренними атмосферными волнами и спорадическими E-слоями в ионосфере Земли. Здесь, наклонные спорадические E-структуры в ионосфере планеты служат в качестве детектора внутренних волн. При восстановлении волновых характеристик используются дисперсионное уравнение и поляризационные соотношения для ВГВ, а также данные стандартной модели для оценки частоты плавучести (Брента-Вяйсяля) на высотах нижней ионосферы Земли.

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 спутника *CHAMP*, 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 *COSMIC-1*), 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 наклонения 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 ($\times 10^6$ 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°) 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 распределениям источников солнечной радиации и осадков частиц. Внутренние атмосферные волны в высоких широтах менее важны в качестве механизма вертикального структурирования слоев вследствие большого угла наклона (~90°) 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 $\sim 3\cdot 10^6$ 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 радиозатменных спутниковых измерений *CHAMP* и *COSMIC-1*, определение их характеристик и изучение взаимосвязи между наклонными спорадическими *E*-структурами и внутренними атмосферными волнами в нижней ионосфере Земли.

1. АНАЛИЗ РАДИОЗАТМЕННЫХ ДАННЫХ СПУТНИКОВ *COSMIC-1* И *CHAMP* В НИЖНЕЙ 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 для изучения эффектов и условий распространения радиоволн (дифракции, рефракции, поглощения и рассеяния в атмосфере, отражения от поверхности суши и океана). В радиозатменном методе

используются дециметровые (ДМ) радиосигналы с несущими частотами $f_1 = 1575.42$ МГц и $f_2 = 1227.60$ МГц, излучаемые навигационными спутниками и принимаемые низкоорбитальными (*COSMIC-1*, *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 планеты. 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 (ВГВ) 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-1* (*FORMOSAT-3/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, а также даны координаты (широта и долгота) зондируемого района ионосферы. Для вертикальных профилей $A(h)$ на рис. 1 характерны особенности, сопровождающиеся всплеском амплитуды, затем ее 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 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.

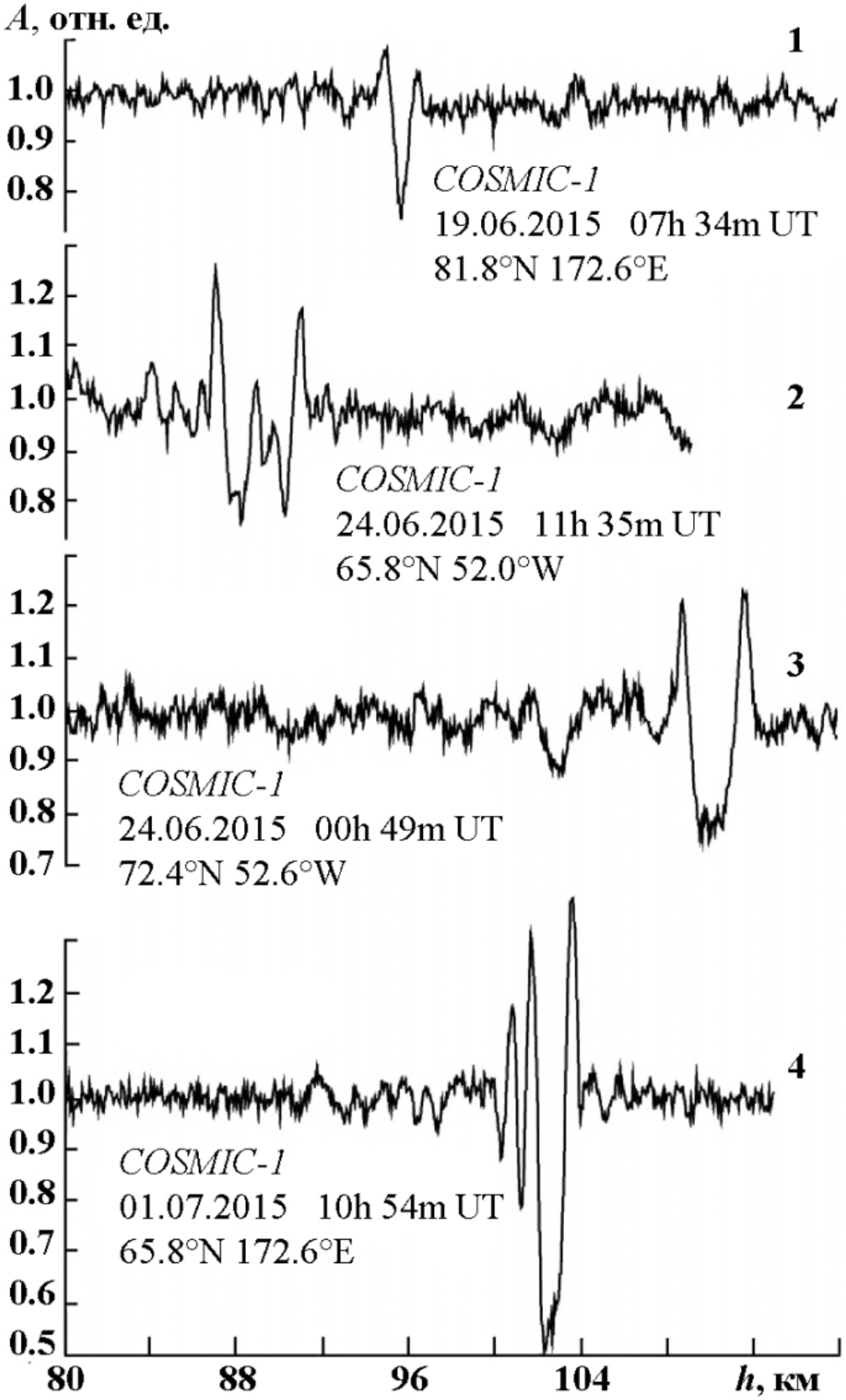

Рис. 1. Зависимости нормированной амплитуды *A* радиозатменного сигнала от высоты перигея луча *h*, полученные с помощью спутников *COSMIC-1* при зондировании четырех районов высокоширотной ионосферы Северного полушария Земли.

2. НАКЛОННЫЕ СПОРАДИЧЕСКИЕ *E*-СЛОИ В ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВНУТРЕННИХ АТМОСФЕРНЫХ ВОЛН

Для определения наклона плазменного слоя нами были использованы радиозатменные данные, полученные в сеансе измерений с помощью спутника *CHAMP* (*Challenging Minisatellite Payload*) 19 ноября 2003 года в южной приэкваториальной ионосфере Земли. Время измерений, координаты зондируемого района, а также координаты передатчика (спутник *GPS*) и приемника (низкоорбитальный спутник *LEO*) показаны на рис. 2. Здесь также представлены 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 эйконале сигнала 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 *GPS*. При этом, фактическая высота его расположения оказывается заметно больше высоты перигея луча [16, 17]. Вычисления показали, что угол наклона плазменного слоя по отношению к локальному горизонту составляет примерно δ = 10.4° ± 0.2° [19].

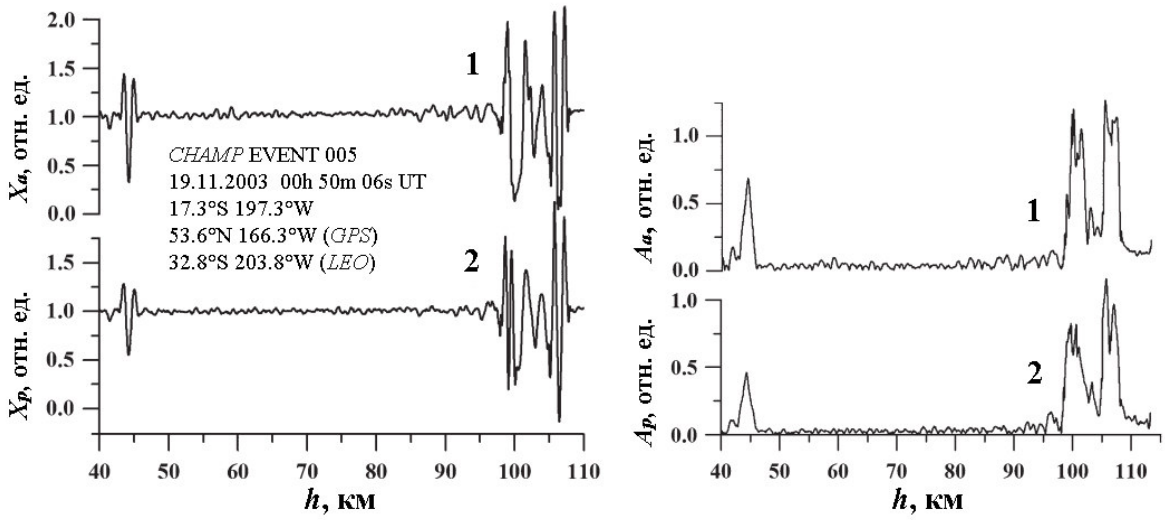

Рис. 2. Вертикальные профили X_a и X_p рефракционного ослабления, найденные из радиозатменных данных *CHAMP* об амплитуде (кривая 1) и эйконале (кривая 2) сигнала на несущей частоте f_1 =1575.42 МГц. Справа показаны соответствующие амплитуды A_a и A_p аналитических сигналов $(X_a - 1)$ и $(X_p - 1)$.

Идея экспериментального определения характеристик внутренней волны, связанной с наклонными плазменными структурами, заключается в следующем. Распространяющаяся через *E*-область мелкомасштабная ВГВ обусловливает 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_s-слоя. Для вычисления характеристик ВГВ, обусловливающих наклоны слоев, необходимо иметь оценки невозмущенной частоты Брента-Вяйсяля (N_b) на фактических высотах (h'), где расположены спорадические слои. Поскольку данные о величине N_b на высотах расположения E-слоев довольно консервативны, то нами были использованы результаты, полученные для эталонной атмосферы Земли: N_b (h' = 95 км) ≈ $2.3\cdot10^{-2}$ рад/с; N_b (h' = 99 км) ≈ $2.2\cdot10^{-2}$ рад/с; N_b (h' = 115 км) ≈ $2.1\cdot10^{-2}$ рад/с [20]. Эти значения частоты плавучести N_b соответствуют значениям периода τ_b ($\tau_b = 2\pi/N_b$) от 4.6 до 5.0 мин, и они согласуются с вертикальным профилем периода плавучести τ_b, рассчитанным для стандартной атмосферы, который показан на стр. 276 в работе [21] (см. рис. 6.5). Из результатов, представленных на рис. 6.5 работы [21], было также определено, что N_b (h' = 133 км) ≈ $2.3\cdot10^{-2}$ рад/с. Используя эти оценки и полученные экспериментальные данные, мы установили, что: $1 >> \tan^2\delta$ и $\omega^2 >> f^2$. С учетом указанных выше неравенств, дисперсионное уравнение и выражения для волновых характеристик приобретают очень простой вид [16]:

$$\omega / N_b = \lambda_z / \lambda_h = |\tan\delta|,\ \tau_i = 2\pi/\omega,\ \left|c_{ph}^{in}\right| = \omega / |k_h| = N_b / |m|,\ \left|c_{pz}^{in}\right| = \omega / |m| = N_b |\tan\delta| / |m|, \quad (1)$$

где ω − собственная частота ВГВ; τ_i − собственный период внутренней волны; $k_h = 2\pi/\lambda_h$ и $m = 2\pi/\lambda_z$ − горизонтальное и вертикальное волновые числа; λ_h и λ_z − горизонтальная и вертикальная длины волн; c_{ph}^{in} и c_{pz}^{in} − собственная горизонтальная и вертикальная фазовые скорости. На основе соотношений (1) можно вычислить характеристики мелкомасштабной ВГВ, которая обусловливает наклон изначально горизонтального спорадического E-слоя в ионосфере Земли:

Слой (h' = 120−130 км): λ_z = 1.67 км; δ = 10.4°; |tan δ| = 0.18; λ_h = 9.3 км; $\left|c_{ph}^{in}\right|$ = 5.2 м/с ; $\left|c_{pz}^{in}\right|$ = 0.93 м/с ; $N_b = 2.2\cdot10^{-2}$ рад/с; $\omega = 3.5\cdot10^{-3}$ рад/с; τ_i = 29.9 мин.

Важно, что величину собственной частоты и периода ВГВ можно определить, зная только значения частоты Брента-Вяйсяля (N_b) и угла (δ) между вектором распространения волны и локальной вертикалью. Следует отметить, что узлы ветрового сдвига, в которых скорость ветра равна нулю, совпадают с расположением E_s-слоев, поэтому собственный волновой период должен совпадать с периодом ВГВ в системе земного наблюдателя [22].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены распределения спорадических E-слоев, полученных на основе обработки измерений мощности и эйконала радиозатменных сигналов в ионосфере Земли и зарегистрированных с помощью спутников *COSMIC-1* и *CHAMP*. 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.

Представлен метод определения характеристик внутренних атмосферных волн, базирующийся на использовании наклонных спорадических E-слоев ионосферы в качестве детектора. Метод основан на том, что внутренняя волна, распространяющаяся через изначально горизонтальный спорадический E-слой, приводит к повороту

плоскости ионизации слоя параллельно фазовому фронту волны. Найдено, что исследуемая внутренняя атмосферная волна имеет период ~30 минут и вертикальную фазовую скорость ~1 м/с. Разработанный метод позволяет исследовать взаимосвязи между мелкомасштабными ВГВ и спорадическими *E*-слоями в ионосфере Земли и существенно расширяет возможности традиционного радиозатменного мониторинга атмосферы.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова 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 Е-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.
19. Павельев А.Г., Матюгов С.С., Яковлев О.И., Павельев А.А, Губенко В.Н., Ануфриев В.А. Исследование воздействия солнечной активности и солнечного ветра на ионосферу Земли с помощью сигналов навигационных систем, зарегистрированных на трассах спутник-спутник // Монография: Современные достижения в плазменной гелиогеофизике / Под ред. Л.М. Зеленого, А.А. Петруковича, И.С. Веселовского. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2018. – 688 с. – ISBN 978-5-9221-1796-8, Часть IV – «Ионосфера и верхняя атмосфера», Глава IV.3, С. 511–533.
20. Gossard E.E, Hooke W.H. Waves in the Atmosphere. Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam–Oxford–New York. 1975.
21. Kelley M.C. The Earth's Ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics. Second Edition. Academic Press. San Diego. California. 2009. 556 pp.
22 Губенко В.Н., Кириллович И.А. Связь наклонных спорадических *E*-слоев и мелкомасштабных атмосферных волн в ионосфере Земли // Космические исследования. 2020. Т. 58. № 3. С. 179–190, doi: 10.31857/S0023420620030024.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!