Наблюдения вариаций полного электронного содержания в области солнечного терминатора в ионосфере

О. П. Борчевкина¹, И. В. Карпов^{1,2}

¹ *Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта
Калининград, 236016, Россия
E-mail: opsuslova@gmail.com*

² *Калининградский филиал института земного магнетизма, ионосферы
и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН
Калининград, 236017, Россия
E-mail: ivkarpov@inbox.ru*

В работе представлена методика выделения спектров вариаций ионосферы с периодами акустико-гравитационных волн (АГВ) и внутренних гравитационных волн (ВГВ) на основе наблюдений сигналов навигационных спутников. Спектральные характеристики вариаций ионосферы определяются по наблюдениям полного электронного содержания (ПЭС) на трассах «спутник – станция приёма сигналов» с применением методов гармонического анализа. Длительность наблюдений сигналов навигационных спутников достигает нескольких часов, что позволяет исследовать динамику спектров вариаций ПЭС в диапазоне периодов АГВ и ВГВ в течение сеанса наблюдений. Возможности предложенной методики показаны на примере анализа гармонических составляющих вариаций ПЭС, полученных в наблюдениях сигналов спутников GPS на станциях Балтийского региона в периоды прохождения солнечного терминатора (СТ). Анализ наблюдений ПЭС в периоды прохождения СТ выявил повышение амплитуды вариаций с периодами АГВ в диапазоне 6–8 и 14–20 мин и особенности их динамики на различных этапах прохождения солнечного терминатора. Повышение амплитуды гармоник с периодами ВГВ (14–20 мин) отмечается перед и после прохождения СТ над станцией наблюдения. Всплески повышений амплитуд гармоник с периодами АГВ (6–8 мин) носят нерегулярный характер и могут проявляться на всех этапах прохождения СТ. На основе полученных результатов делается предположение, что вариации ионосферы в рассматриваемых частотных диапазонах обусловлены распространением волн из нижних слоёв атмосферы.

Ключевые слова: ионосфера, полное электронное содержание, акустико-гравитационные волны, внутренние гравитационные волны, солнечный терминатор

Одобрена к печати: 03.11.2017

DOI:10.21046/2070-7401-2018-15-1-299-305

Введение

В настоящее время отмечается возросший интерес к изучению акустико-гравитационных волн (АГВ) и короткомасштабных внутренних гравитационных волн (ВГВ) в атмосфере Земли. Это объясняется тем, что согласно теоретическим представлениям волны этого частотного диапазона играют важную роль в реализации динамических связей процессов в нижних и верхних атмосферных слоях. В то же время появились возможности проведения экспериментальных исследований с высоким пространственным и временным разрешением наблюдений, что позволяет достоверно установить частотные характеристики и типы волн. Источниками АГВ в нижней атмосфере могут являться процессы, обусловленные сейсмической или метеорологической активностью, орографическими особенностями и др. (Антонова и др., 2006; Перцев, Шалимов, 1996; Fritts, Alexander, 2003; Hocke, Schlegel, 1996; Laštovichka, 2006; Yiğit et al., 2016). Как правило, эти источники не имеют регулярного характера, что в значительной мере затрудняет исследование спектральных характеристик возбуждаемых атмосферных волн. Это обстоятельство определяет важность исследования возмущений атмосферы при прохождении солнечного терминатора (СТ), поскольку СТ является регулярным

источником вариаций параметров атмосферы в широком диапазоне частот (Сомсиков, 2011). К тому же регулярность возмущений создаваемых СТ позволяет тестировать развиваемые методики анализа наблюдений с целью выделения вкладов волн.

Исследование вариаций параметров ионосферы с периодами АГВ

В экспериментальных исследованиях ионосферы широкое распространение получили методы, основанные на наблюдениях сигналов навигационных спутников GPS и ГЛОНАСС. Достоинства этих методов определяются высоким пространственным и временным разрешением. В таких наблюдениях определяется ионосферный параметр ПЭС (полное электронное содержание), методики выделения которого и особенности их применения для волнового анализа приводятся в работах (Афраймович и др., 2011; Astafyeva et al., 2008; Baran et al., 1997).

Отметим также, что периоды обращения навигационных спутников практически кратны суткам. Это означает, что один и тот же спутник будет наблюдаться на станции приёма в одни и те же периоды местного времени. Длительность наблюдений сигналов отдельных спутников, как правило, более одного часа, что даёт возможность выделить вариации ионосферы с периодами АГВ. Эти обстоятельства позволяют исследовать особенности ионосферных вариаций, наблюдаемых в течение нескольких дней в одни и те же периоды местного времени, и выделять возмущения, обусловленные изменениями геофизической обстановки.

В работе основное внимание направлено на выделение вариаций с периодами АГВ (периоды 5–20 мин). Атмосферные волны этого частотного диапазона часто рассматриваются как наиболее вероятный процесс, определяющий взаимосвязи нижних и верхних атмосферных слоёв. Такие АГВ могут распространяться практически вертикально из нижней атмосферы и достигать высот ионосферы (Ерохин и др., 2007; Карпов, Кшевецкий, 2014; Куницын и др., 2007; Петрухин и др., 2012).

С целью выделения высокочастотных составляющих вариаций ПЭС в работе определялся спектр вариаций дифференциального ПЭС, определяемого как отношение разности значений ПЭС на трассе «спутник – станция приёма сигналов», полученных в двух последовательных наблюдениях, к шагу по времени. Для определения динамики спектров в период наблюдений применялось оконное преобразование Фурье с прямоугольным окном длительностью ~1 ч.

Алгоритм сбора и обработки данных наблюдений для определения частотных характеристик вариаций ПЭС включал следующие ключевые пункты:

- 1) отбор спутников, период наблюдения сигналов которых приходится на прохождение солнечного терминатора;
- 2) сбор данных о вариациях ПЭС, времени пролёта спутника и траектории его движения;
- 3) вычисление дифференциального ПЭС;
- 4) расчёт изменений спектра вариаций дифференциального ПЭС в период наблюдения спутника.

Для исследования частотных характеристик вариаций ПЭС в период прохождения СТ были рассмотрены наблюдения станций в Прибалтийском регионе: LAMA (53°53' с.ш. 20°40' в.д.), г. Олыштын, Польша; RIGA (42°33' с.ш. 23°23' в.д.), г. Рига, Латвия; VLNS (40°38' с.ш. 16°42' в.д.), г. Вильнюс, Литва.

В анализе наблюдений сигналов отдельных спутников GPS выделялись вариации ПЭС с периодами АГВ и ВГВ, что позволило детально представить динамику этих вариаций в период наблюдений. Наблюдения выполнены в марте 2010 г. в периоды прохождения утреннего и вечернего СТ.

На рис. 1 (см. с. 301) представлены спектры вариаций ПЭС над исследуемыми станциями 1 марта 2010 г. во время прохождения утреннего СТ, определённые по наблюдениям спутников GPS.

Как видно на *рис. 1*, спектры вариаций и их изменение во времени, определённые по наблюдениям различных спутников, в целом дают схожие результаты. Некоторые различия в спектрах, очевидно, связаны с положением спутника относительно станции. Характерной особенностью изменений спектров является усиление гармоник с периодами АГВ (6–8 мин) и короткомасштабных ВГВ (14–20 мин) перед прохождением СТ и после его прохождения, продолжающееся в течение ~1,5–2 ч.

Рис. 1. Спектр вариаций ПЭС в диапазоне периодов 2–20 мин в верхней атмосфере над станциями LAMA (53°53' с. ш. 20°40' в. д.), г. Олыштын, Польша; RIGA (42°33' с. ш. 23°23' в. д.), г. Рига, Латвия; VLNS (40°38' с. ш. 16°42' в. д.), г. Вильнюс, Литва; 1 марта 2010 г. во время прохождения утреннего СТ

На *рис. 2* показаны спектры вариаций, полученные в наблюдениях в период прохождения вечернего терминатора.

Как видно на *рис. 2*, перед прохождением и после прохождения вечернего СТ, так же как и на утреннем терминаторе (см. *рис. 1*), отмечается усиление гармоник с периодами ВГВ, близкими к периоду Вьяйсяля-Брента в F-области ионосферы (16–18 мин). Продолжительность повышения амплитуд ВГВ составляет ~1–2 ч. Непосредственно в период прохождения СТ снижается активность ВГВ. Всплески повышенных амплитуд колебаний ПЭС с периодами АГВ (6–8 мин) в области СТ носят нерегулярный характер и могут проявляться на всех этапах прохождения СТ. Продолжительность повышений амплитуды таких АГВ составляет ~0,5–1 ч.

Рис. 2. То же, что и на *рис. 1*, — для периода прохождения вечернего терминатора

Различия в динамике волновых компонент определяются особенностями их генерации и распространения в атмосфере. Солнечный терминатор является регулярным источником генерации атмосферных волн в широком диапазоне частот. В нашем исследовании выделялись вклады АГВ с периодами 2–20 мин, которые включают инфразвуковые волны и внутренние гравитационные волны. В теоретических исследованиях (Карпов, Кшевецкий, 2014; Krasnov et al., 2007) было показано, что инфразвуковые и внутренние гравитационные волны с периодами, близкими к периоду Вайсяля-Брента, возбуждаемые у поверхности Земли, могут достигать высот ионосферы. К тому же ВГВ с периодами меньше периода Вайсяля-Брента в верхней атмосфере (меньше ~15 мин) могут быть захвачены в термосферный волновод на высотах 80–200 км. В этом случае возмущения с периодами таких волн должны проявляться в ионосфере над источником возмущений с небольшими задержками по времени, которые могут составлять 15–30 мин и продолжаться значительное время по сравнению с периодами волн. В целом результаты анализа наблюдений подтверждают такие представления и позволяют предположить, что рассматриваемые возмущения являются следствием генерации волн в приземных слоях атмосферы.

Вместе с тем на процессы распространения таких волн существенное влияние оказывают процессы в нижней атмосфере, и в частности метеорологические процессы. Изменчивость состояния нижней атмосферы в условиях прохождения СТ может приводить к наблюдаемой нерегулярной структуре, всплескам волновой активности колебаний в этом частотном диапазоне. Исследования специфики проявления активности АГВ в верхней атмосфере в условиях метеорологических возмущений также могут быть выполнены с применением представленных методов анализа вариаций ПЭС на трассах «спутник – станция приёма сигналов».

Выводы

Таким образом, результаты представленного исследования показывают:

1. Предложенная методика анализа наблюдений вариаций ПЭС на трассе «спутник – станция приёма сигналов» позволяет выделить вклады АГВ в вариациях ионосферы.
2. Анализ наблюдений ПЭС в периоды прохождения СТ выявил повышение амплитуды вариаций с периодами АГВ в диапазонах 6–8 и 14–20 мин и особенности их динамики на различных этапах прохождения СТ. На основе анализа полученных результатов делается предположение, что вариации ионосферы в этих частотных диапазонах обусловлены распространением волн из нижних слоёв атмосферы и волноводным распространением на высотах термосферы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 15-05-01665) и проекта повышения конкурентоспособности «5-100» БФУ имени И. Канта.

Литература

1. Антонова В. П., Дунгенбаева К. Е., Зализовский А. В., Инчин А. С., Крюков С. В., Сомников В. М., Ямпольский Ю. М. Различие спектров акустико-гравитационных волн в дневные и ночные часы, обусловленное неравновесными эффектами в атмосфере // Геомагнетизм и аэронавигация. 2006. Т. 46. № 1. С. 106–114.
2. Афраймович Э. Л., Астафьева Э. И., Войсков С. В., Гаврилюк Н. С., Едемский И. К., Живетьев И. В., Ишин А. Б., Косоголов Е. А., Леонович Л. А., Лесюта О. С., Паламарчук К. С., Перевалова Н. П., Полякова А. С., Смольков Г. Я., Ясюкевич Ю. В. Исследования ионосферных возмущений методами GPS-радиозондирования в ИСЗФ СО РАН // Солнечно-земная физика. 2011. Вып. 18. С. 24–39.
3. Ерохин Н. С., Зольникова Н. Н., Михайловская Л. А. Особенности взаимодействия внутренних гравитационных волн с температурно-ветровыми структурами атмосферы при распространении

- в ионосферу // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2007. Вып. 4. Т. 2. С. 84–89.
4. Карпов И. В., Кшевецкий С. П. Механизм формирования крупномасштабных возмущений в верхней атмосфере от источников АГВ на поверхности Земли // Геомагнетизм и аэрномия. 2014. Т. 54. № 4. С. 553–562.
  5. Куницын В. Е., Сураев С. Н., Ахмедов Р. Р. Моделирование распространения акустико-гравитационных волн в атмосфере для различных поверхностных источников // Вестник Московского ун-та. Сер. 3. Физика. Астрономия. 2007. № 2. С. 59–63.
  6. Перцев Н. Н., Шалимов С. Л. Генерация атмосферных гравитационных волн в сейсмически активном регионе и их влияние на ионосферу // Геомагнетизм и аэрномия. 1996. Т. 36. С. 111–118.
  7. Петрухин Н. С., Пелиновский Е. Н., Бацына Е. К. Безотражательные акустико-гравитационные волны в атмосфере Земли // Геомагнетизм и аэрномия. 2012. Т. 52. № 6. С. 854–860.
  8. Сомников В. М. Солнечный терминатор и динамические явления в атмосфере (обзор) // Геомагнетизм и аэрномия. 2011. Т. 51. № 6. С. 723–735.
  9. Astafyeva E. I., Afraimovich E. L., Voeykov S. V. Generation of secondary waves due to intensive large-scale AGW traveling // Advances in Space Research. 2008. V. 41. P. 1459–1462.
  10. Baran L. W., Shagimuratov I. I., Tepenitzina N. J. The Use of GPS for Ionospheric Studies // Artificial satellites. J. Planetary Geodesy. 1997. V. 32. No. 1. P. 49–60.
  11. Fritts D. C., Alexander M. J. Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere // Reviews of geophysics. 2003. V. 41. No. 1. P. 1–64.
  12. Hocke K., Schlegel K. A review of atmospheric gravity waves and Traveling ionospheric disturbances: 1982–1995 // Annales Geophysicae. 1996. V. 14. P. 917–940.
  13. Krasnov V., Drobzheva Ya., Lastovicka J. Acoustic energy transfer to the upper atmosphere from sinusoidal sources and a role of nonlinear processes // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2007. V. 69. No. 12. P. 1357–1365.
  14. Laštovichka J. Forcing of the ionosphere by waves from below // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2006. V. 68. No. 3–5. P. 479–497.
  15. Yiğit E., Knizova P. K., Georgieva K., Ward W. A review of vertical coupling in the Atmosphere-Ionosphere system: Effects of waves, sudden stratospheric warmings, space weather, and of solar activity // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2016. V. 141. P. 1–12.

Observations of the total electron content variations in the solar terminator region of the ionosphere

O. P. Borchevkina¹, I. V. Karpov^{1,2}

¹ Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad 236016, Russia
E-mail: opsuslova@gmail.com

² Kaliningrad Branch of N. V. Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS, Kaliningrad 236017, Russia
E-mail: ivkarpov@inbox.ru

This work presents the technique for segregating the spectra of ionosphere variations with periods of acoustic gravity waves (AGWs) and internal gravity waves (GWs) based on observations of navigational satellites signals. Spectral characteristics of ionosphere variations are determined using observations of the total electron content (TEC) on the “satellite – ground-based receiver” routes with the help of harmonic analysis methods. Observation time for navigational satellites signals may be up to several hours, which allows to analyze the dynamics of TEC variations spectra within the range of AGWs and GWs periods during one observation session. Capabilities of the proposed technique are exemplified by analysis of harmonic components of TEC variations, obtained by observing the GPS satellites signals at the Baltic Region ground-based receivers at the time of passing of the solar terminator (ST). Analysis of TEC observations made at the time of passing of the ST has revealed the increase of amplitudes of variations with AGWs periods within the ranges 6–8 min and 14–20 min, and shown the specifics of their dynamics at all stages of passage of the solar terminator. The increase of amplitudes

of harmonics with GWs periods in the range 14–20 min is registered before and after the passing of the solar terminator over the observing station. The amplitude spikes for harmonics with AGWs periods in the range 6–8 min are random and may appear at all stages of passage of the ST. According to the results obtained, it is assumed that ionosphere variations in frequency ranges involved are driven by upward propagation of waves from the lower atmosphere.

Keywords: ionosphere, total electron content, acoustic-gravity waves, internal gravity waves, solar terminator

Accepted: 03.11.2017

DOI:10.21046/2070-7401-2018-15-1-299-305

References

1. Antonova V. P., Dungenbaeva K. E., Zalizovskii A. V., Inchin A. S., Kryukov S. V., Somsikov V. M., Yam-pol'skii Yu. M., Difference between the spectra of acoustic gravity waves in daytime and nighttime hours due to nonequilibrium effects in the atmosphere, *Geomagnetism and Aeronomy*, 2006, Vol. 46, No. 1, pp. 101–109.
2. Afraimovich E. L., Astafyeva E. I., Voeikov S. V., Gavriluk N. S., Edemsky I. K., Zhivetyev I. V., Ishin A. B., Kosogorov E. A., Leonovich L. A., Lesyuta O. S., Palamarchuk K. S., Perevalova N. P., Polyakova A. S., Smolkov G. Ya., Yasyukevich Yu. V., Research into ionospheric disturbances by methods of GPS radio sounding at ISTP SB RAS, *Solar-Terrestrial Physics*, 2011, No. 18, pp. 24–39.
3. Erokhin N. S., Zol'nikova N. N., Mikhailovskaya L. A., Osobennosti vzaimodeistviya vnutrennykh gravitatsionnykh voln s temperaturno-vetrovymi strukturami atmosfery pri rasprostraneni v ionosferu (Features of the interaction of internal gravity waves with the temperature-wind structures of the atmosphere during propagation into the ionosphere), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2007, Vol. 4, No. 2, pp. 84–89.
4. Karpov I. V., Kshevetskii S. P., Formation of large-scale disturbances in the upper atmosphere caused by acoustic gravity wave sources on the Earth's surface, *Geomagnetism and Aeronomy*, 2014, Vol. 54, No. 4, pp. 513–522.
5. Kunitsyn V. E., Suraev S. N., Akhmedov R. R., Modelirovanie rasprostraneniya akustiko-gravitatsionnykh voln v atmosfere dlya razlichnykh poverkhnostnykh istochnikov (Modeling of atmospheric propagation of acoustic gravity waves generated by different surface sources), *Moscow University Physics Bulletin*, 2007, Vol. 62, No. 2, pp. 122–126.
6. Pertsev H. H., Shalimov S. L., The generation of atmospheric gravity waves in a seismically active region and their effect on the ionosphere, *Geomagnetism and Aeronomy*, 1996, Vol. 36, pp. 111–118.
7. Petrukhin N. S., Pelinovsky E. N., Batsyna E. K., Reflectionless acoustic gravity waves in the Earth's atmosphere, *Geomagnetism and Aeronomy*, 2012, Vol. 52, No. 6, pp. 814–819.
8. Somsikov V. M., Solar terminator and dynamic phenomena in the atmosphere: A review, *Geomagnetism and Aeronomy*, 2011, Vol. 51, No. 6, pp. 707–719.
9. Astafyeva E. I., Afraimovich E. L., Voeykov S. V., Generation of secondary waves due to intensive large-scale AGW traveling, *Advances in Space Research*, 2008, Vol. 41, pp. 1459–1462.
10. Baran L. W., Shagimuratov I. I., Tepenitzina N. J., The use of GPS for ionospheric studies, *Artificial Satellites. J. Planetary Geodesy*, 1997, Vol. 32, No. 1, pp. 49–60.
11. Fritts D. C., Alexander M. J., Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere, *Reviews of geophysics*, 2003, Vol. 41, No. 1, pp. 1–64.
12. Hocke K., Schlegel K., A review of atmospheric gravity waves and Traveling ionospheric disturbances: 1982–1995, *Annales Geophysicae*, 1996, Vol. 14, pp. 917–940.
13. Krasnov V., Drobzheva Ya., Lastovicka J., Acoustic energy transfer to the upper atmosphere from sinusoidal sources and a role of nonlinear processes, *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2007, Vol. 69, No. 12, pp. 1357–1365.
14. Laštovichka J., Forcing of the ionosphere by waves from below, *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2006, Vol. 68, No. 3–5, pp. 479–497.
15. Yiğit E., Knizova P. K., Georgieva K., Ward W., A review of vertical coupling in the Atmosphere-Ionosphere system: Effects of waves, sudden stratospheric warmings, space weather, and of solar activity, *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2016, Vol. 141, pp. 1–12.