

Том II, с. 527–530

УДК: 537.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ, ГЕНЕРИРУЕМЫХ СОЛНЕЧНЫМ ТЕРМИНАТОРОМ, ПО ДАННЫМ СЕТИ ГНСС-СТАНЦИЙ, РАСПОЛОЖЕННЫХ В ПРИВОЛЖСКОМ ФЕДЕРАЛЬНОМ ОКРУГЕ

И. А. Насыров Д. А. Когогин М. А. Шербоев, Р. В. Загретдинов

КФУ, Институт физики, 4200008, г. Казань, ул. Кремлёвская, 16А

E-mail: dkogogin@kpfu.ru

Аннотация. В данной работе приведены результаты регистрации в рядах ПЭС ионосферных волновых возмущений, генерируемых солнечным терминатором в период с 1 ноября 2015 года по 31 декабря 2016 года (суммарно 426 дней). Сигналы от глобальных навигационных спутниковых систем регистрировались в двух пунктах: Астрономической обсерватории им. В. П. Энгельгардта (55.83° с.ш., 48.91° в.д.) и Казани (55.80° с.ш., 49.13° в.д.). Расстояния между измерительными пунктами: АОЭ – Казань ~ 20 км. На основе анализа массива данных рядов ПЭС были получены количественные оценки параметров, зарегистрированных крупномасштабных волновых возмущений, генерируемых при движении СТ.

Ключевые слова: СТ; ПЭС; GPS; ионосфера; среднемасштабные и крупномасштабные волны

STUDY OF IONOSPHERIC WAVE DISTURBANCES GENERATED BY THE SOLAR TERMINATOR BY GNSS NETWORK OF VOLGA FEDERAL DISTRICT

I. A. Nasyrov, D. A. Kogogin, M. A. Sherboev, R. V. Zagretdinov

Abstract. This work presents the results of registration ionospheric wave disturbances generated by the solar terminator in the TEC series in the period from November 1, 2015 to December 31, 2016 (a total of 426 days). Signals from global navigation satellite systems were recorded at two points: Engelgardt Astronomical Observatory (EAO) (55.83° N, 48.91° E) and Kazan (KZN) (55.80° N, 49.13° E). Distances between measuring points: EAO – KZN ~ 20 km. Based on the analysis of the data set of TEC series, quantitative estimates of the parameters recorded by LSTID generated during the motion of the ST were obtained.

Keywords: solar terminator; ST; TEC; ionosphere; LSTID and MSTID; GPS

Введение

Солнечный терминатор (СТ) представляет собой движущейся диск, разделяющий атмосферу Земли на ночную и дневную область с различными параметрами. СТ является постоянным, естественным источником волновых возмущений в ионосфере и магнитосфере Земли. Генерируемые СТ неоднородности проявляет себя практически в течение всех суток и на всех высотах атмосферы. Первое экспериментальное подтверждение эффективности генерации волн на ионосферных высотах при движении СТ приведено в работе [1]. В окрестности СТ атмосферный газ находится в неравновесном состоянии, что приводит к неоднородностям атмосферы [2]. Одной из основных особенностей СТ, как источника волновых возмущений в ионосфере, является его глобальность и различие характеристик генерируемых ионосферных неоднородностей при его прохождении во время восхода (утренний сектор СТ) и захода Солнца (вечерний сектор СТ). Утренний сектор СТ в основном характеризуется процессами нагрева и фотоионизации атмосферы, в то время как вечерний сектор СТ определяется процессами релаксации, которые приводят к уменьшению потока солнечной радиации в атмосфере. Поэтому характерная ширина восходной области СТ значительно меньше характерной ширины заходной области. Это обусловлено, в частности, более высокочастотным спектром, генерируемых СТ возмущений атмосферы в утренние часы, чем в вечерние [3]. Граница области СТ отличается от оптической границы дня и ночи

так как они по-разному влияют на атмосферу. Исходя из этого более правильное определение СТ дал в своей работе Сомсиков [4]. Расчеты моделей СТ, выполненные на основе моделей потока солнечной радиации, подтвердили что СТ является областью наиболее быстрого изменения параметров, влияющих на состояние атмосферы [5].

Сезонные характеристики зарегистрированных ионосферных возмущений

Одной из основных причин значительного прогресса в исследованиях ионосферных неоднородностей с помощью радиофизических методов, являлось развёртывание в 80-х годах прошлого столетия навигационных систем второго поколения – GPS и ГЛОНАСС, и позднее ряда других. Навигационные спутниковые системы позволяют непрерывно наблюдать пространственно-временную структуру ионосферных возмущений с хорошим временным разрешением, а также обеспечивают глобальный охват. Под непрерывностью подразумевается постоянное нахождение не менее трех спутников в зоне видимости ГНСС приёмника, обеспечивающих достаточное количество лучей спутник–приёмник, пересекающих исследуемую область. При распространении через ионосферу у сигналов навигационных спутников появляется дополнительный набег фазы, обусловленный дисперсией радиоволн в ионосферной плазме и линейно связанный с полным электронным содержанием (ПЭС) на траектории распространения. Таким образом, информации о ПЭС получается посредством фазовых и псевдодальномерных измерений сигналов навигационных систем GPS/ГЛОНАСС и выражается в специальных единицах TECU ($1 \text{ TECU} = 10^{16} / \text{м}^2$). С помощью статистической обработки большого количества рядов и карт ПЭС удалось выявить новые закономерности поведения акустическо-гравитационных волн в области СТ [6]. В данной работе для расчета ПЭС использовались формулы приведённые в работе [7], в которой ПЭС было рассчитано по измерениям фазы сигнала и разности псевдодальностей.

Из исходной зависимости $I(t)$ (наклонное ПЭС от времени (англ. s/TEC)), удаляется тренд при помощи вычитания скользящего среднего с линейной весовой функцией [8]:

$$dI(j) = I(j) - \frac{1}{N} \sum_{n=j-N}^j j + N(I[n] \frac{N - |n - j|}{N}),$$

$dI(j)$ - вариации наклонного ПЭС, N – параметр усреднения, равный 15-20 мин.

Крупномасштабные перемещающиеся ионосферные возмущения являются волнообразными возмущениями ионосферной плазмы. Поскольку эти волны распространяются внутри термосферы, они могут вызывать колебания ионосферы. Для анализа рядов ПЭС в этой работе были использованы данные, полученные с приёмников, входящих в сеть ГНСС-станций Приволжского федерального округа, расположенные в Казани (п. Казань (англ. KZN)) (55.80° с.ш., 49.13° в.д.) и Астрономической обсерватории им. В. П. Энгельгардта (п. АОЭ (англ. ЕАО)) (55.83° с.ш., 48.91° в.д.). Данные приёмные пункты предоставляет ГНСС данные с временным разрешением 30 с. В результате обработки экспериментальных данных полученных в каждом из пунктов было установлено, что генерация крупномасштабных волновых возмущений при прохождении утреннего и вечернего сектора СТ происходит не каждый день. Количество таких случаев зависит от сезонов года. Критериями по которым регистрируемые ионосферные возмущения идентифицировались как, крупномасштабные волновые возмущения, были выбраны их амплитуда и длительность фазового фронта. Полный размах амплитуды для подобных возмущений должен превышать 0.5 TECU, а длительность распространения фазового фронта возмущения быть более 20 минут. Масштабы зарегистрированных возмущений, генерируемых при прохождении СТ, варьируется в пределах от 30 до 160 мин. Они были разделены на 2 группы: крупномасштабные (с продолжительностью более 60 мин рис. 1) и среднемасштабные (от 30 до 60 мин рис. 2).

Посредством обработки массива экспериментальных данных рядов ПЭС за 2016 год было установлено, что наблюдаются три сценария возникновения крупномасштабных волновых возмущений, генерируемых движением СТ: 1) на заднем фронте СТ; 2) на переднем фронте СТ; 3) на широте фронта СТ. При этом чаще всего возмущения возникают на переднем и заднем фронтах СТ. Количество дней когда были зарегистрированы крупномасштабные волновые возмущения на широте самого фронта СТ в утреннем и вечернем секторах СТ за все сезоны 2016 г.

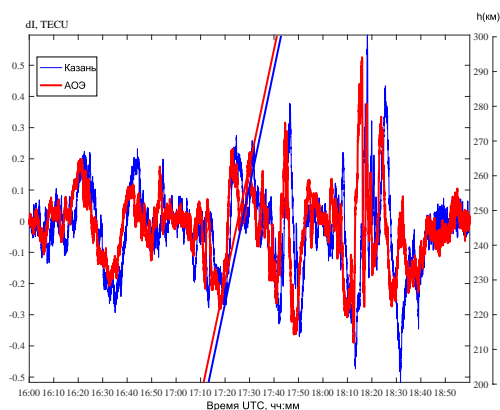


Рис. 1. Вечерний сектор СТ. Ряды наклонного ПЭС для спутника GPS № 25 над пунктами Казань (синяя кривая) и АОЭ (красная кривая) 2 августа 2016 г. Синей и красной линией показано время прохода СТ на различных высотах для пунктов Казань и АОЭ.

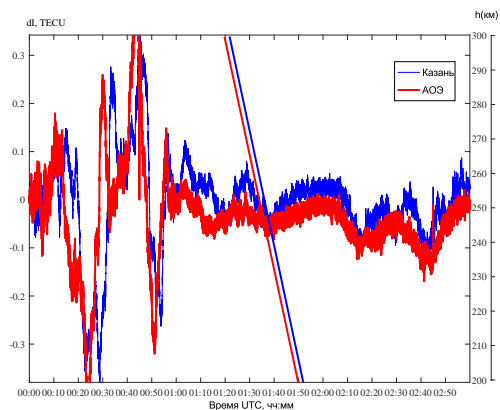


Рис. 2. Утренний сектор СТ. Ряды наклонного ПЭС для спутника GPS № 19 над пунктами Казань (синяя кривая) и АОЭ (красная кривая) 9 октября 2016 г. Синей и красной линией показано время прохода СТ на различных высотах для пунктов Казань и АОЭ.

почти одинаково и составляет $\sim 27\%$. В тоже время, количество случаев регистрации крупномасштабных волновых возмущений в вариациях ПЭС, возникающих на заднем и переднем фронте СТ различны для утреннего и вечернего секторов СТ. При прохождении утреннего сектора СТ в большинстве случаев крупномасштабные волновые возмущения наблюдается на переднем фронте $\sim 43\%$, в отличие от $\sim 30\%$ случаев на заднем фронте. Относительный сдвиг, между временем прохода СТ на высоте 200 км и временем регистрации крупномасштабного возмущения в рядах ПЭС для двух пунктов Казань и АОЭ при утреннем секторе СТ варьируется от 20 до 120 мин. В отличие от утреннего сектора СТ при прохождении вечернего сектора СТ крупномасштабные волновые возмущения чаще всего наблюдается на заднем фронте СТ (после прохождения СТ)

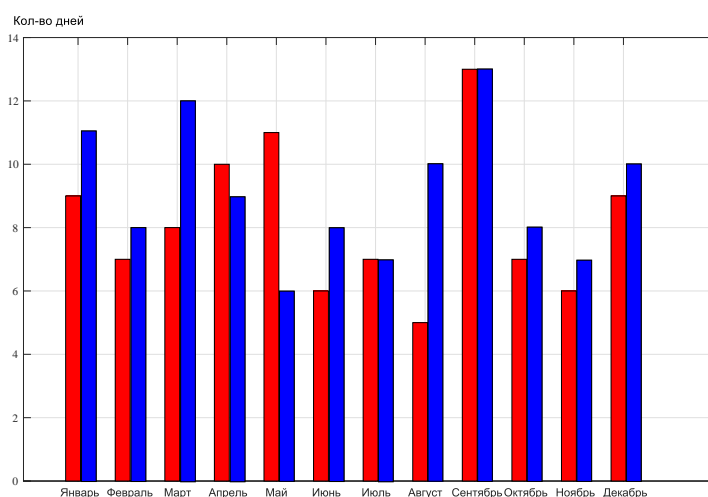


Рис. 3. Количественные оценки распределения сеансов регистрации крупномасштабных волновых возмущений, генерируемых при движении СТ за каждый месяц 2016 г. Красные столбы сеансы для п. АОЭ, синие столбы для п. Казань.

в $\sim 43\%$ случаев, против $\sim 29\%$ для переднего фронта. Относительный сдвиг между временем регистрации крупномасштабного возмущения и временем прохода СТ на высоте 200 км при вечернем секторе СТ составляет от 10 до 100 мин. Для оценки сезонной зависимости были выбраны данные только за весь 2016 год. Это было сделано для равномерного распределения количества дней каждого сезона. Полученные количественные оценки распределения успешных сеансов регистрации крупномасштабных волновых возмущений, генерируемых при движении СТ за каждый месяц 2016 г. приведены на рис. 3.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Казанского (Приволжского) федерального университета.

Список литературы

1. Herron T. J. Phase velocity dispersion of F-region Waves // J. Atmos. Terr. Phys. — 1973. — Vol. 35. — P. 101–124.
2. Somsikov V. M. On mechanisms of formation of atmospheric inhomogenities in the solar terminator region // J. Atm. Ter. Ph. — 1995. — Vol. 57. — P. 75–83.
3. Сомсиков В. М. Солнечный терминатор и динамика атмосферы. Алма-Ата: Наука. — 1983. — 192 с.
4. Somsikov V. M. A spherical model of wave generation in atmosphere by solar terminator // J. Atmos. Terr. Phys. — 1987. — Vol. 49. — P. 433–438.
5. Курмангалиев Д. А., Сомсиков В. М. О влиянии солнечного терминатора на волны в атмосфере // Динамика ионосферы. — 1991. — С. 98–102.
6. Афраймович Э. А., Едемский И. К. Исследования ионосферных возмущений методами GPS-радиозондирование // Солнечно-земная физика. — 2011. — № 18. — С. 24–39.
7. Рябов А. В., Грач С. М., Шиндин А. В., Котик Д. С. Исследование характеристик крупномасштабных неоднородностей ионосферы, вызванных воздействием на неё мощного коротковолнового радиоизлучения, с помощью сигналов GPS // Известия вузов. Радиофизика. — 2011. — Т. 54, № 7. — С. 485–496.
8. Шиндин А. В., Грач С. М., Сергеев Е. Н., Рябов А. В. Пространственная корреляция крупномасштабных неоднородностей плотности (по данным анализа GPS сигналов) и искусственного оптического свечения в линии 630 нм в ионосфере, возмущенной мощной радиоволной // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. — 2012. — № 4(1). — С. 105–113.