

**ВОЗМУЩЕНИЯ ВАРИАЦИЙ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ  
В УСЛОВИЯХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО ШТОРМА 29–30 МАРТА 2015 г.  
ПО НАБЛЮДЕНИЯМ В КАЛИНИНГРАДЕ**

<sup>1</sup>О.П. Борчевкина, <sup>1,2</sup>И.В. Карпов

<sup>1</sup>Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия

<sup>2</sup>Западное отделение Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,  
Калининград, Россия  
opsuslova@gmail.com

**DISTURBANCES IN TOTAL ELECTRON CONTENT VARIATIONS  
DURING THE METEOROLOGICAL STORM ON MARCH 29–30, 2015,  
ACCORDING TO OBSERVATIONS IN KALININGRAD**

<sup>1</sup>O.P. Borchevkina, <sup>1,2</sup>I.V. Karpov

<sup>1</sup>Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

<sup>1,2</sup>West Department of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism,  
Ionosphere and Radio Wave Propagation, Kaliningrad, Russia

**Аннотация.** В работе представлены результаты наблюдений полного электронного содержания (ПЭС) в период метеорологического шторма 29–30 марта 2015 г. Результаты наблюдений показали, что прохождение метеорологического шторма сопровождается значительным понижением значений ПЭС. Спектральный анализ вариаций ПЭС показал, что в день метеорологического шторма отмечается существенное повышение амплитуд гармоник с периодами акустико-гравитационных волн (АГВ) 6–8 и 14–20 мин. Предполагается, что усиление волновой активности АГВ в период метеорологического возмущения может являться причиной продолжительных понижений значений ПЭС.

**Ключевые слова:** полное электронное содержание, ионосфера, акустико-гравитационные волны, метеорологические штормы.

**Abstract.** The paper presents the results of observations of the total electronic content (TEC) during the meteorological storm on March 29–30, 2015. It was shown that the passage of the meteorological storm is accompanied by a significant decrease in TEC values. Spectral analysis of TEC variations showed that on the day of the meteorological storm there was a significant increase in the amplitudes of harmonics with periods of acoustic-gravity waves (AGW) of 6–8 and 14–20 min. It is assumed that the amplification of the wave activity of the AGW in the period of meteorological disturbance may be the cause of prolonged decreases in TEC values.

**Keywords:** total electron content, ionosphere, acoustic-gravity waves, meteorological storms.

Метеорологические возмущения являются источником атмосферных волн в широком диапазоне частот, в том числе и акустико-гравитационных волн (АГВ). АГВ, распространяющиеся из нижней атмосферы, могут достигать высот верхней атмосферы и вследствие процессов диссипации существенно влиять на характеристики вариаций параметров среды [Данилов и др., 1987; Rishbeth, 2006; Laštovichka, 2006; Polyakova, Perevalova, 2013].

В работе представлены результаты наблюдений вариаций ионосферы во время метеорологического шторма 29–30 марта 2015 г. в Калининграде (54° N, 20° E), который развивался на фоне резкого снижения атмосферного давления с 764 до 740 мм рт. ст. и сопровождался усилением ветра с порывами до 15 м/с. Геомагнитная и солнечная активность в период шторма оставалась спокойной.

На рис. 1 показаны суточные вариации полного электронного содержания (ПЭС), полученные по наблюдениям в Калининграде в период 25.03–04.04.2015. Как видно из рисунка, в период прохождения метеорологического шторма отмечается существенное понижение значений ПЭС в дневное время, достигающего 30 % по отношению к метеоспокойным дням. Ионосферная реакция на изменение метеорологической обстановки возникает достаточно быстро, в течение 3–6 ч. Такая незначи-

тельная по времени задержка в реакции ионосферы позволяет предположить, что наиболее вероятным переносчиком энергии метеорологического возмущения в верхнюю атмосферу являются АГВ [Карпов и др., 2016a].

Для оценки оправданности этого предположения был выполнен анализ частотных характеристик вариаций ПЭС с целью выделения вкладов АГВ в период прохождения метеорологического шторма. Для исследования спектральных характеристик

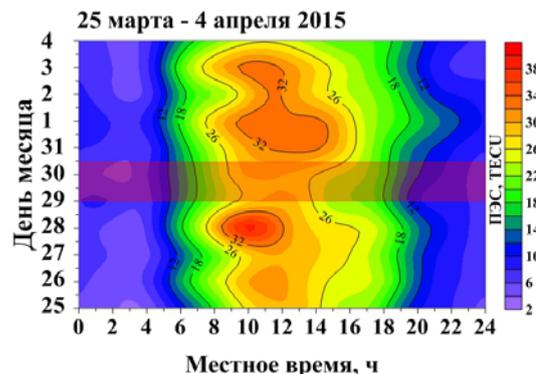


Рис. 1. Суточные вариации ПЭС 25 марта – 4 апреля по наблюдениям на ст. Калининград (54° N, 20° E). Область метеорологического шторма отмечена красным

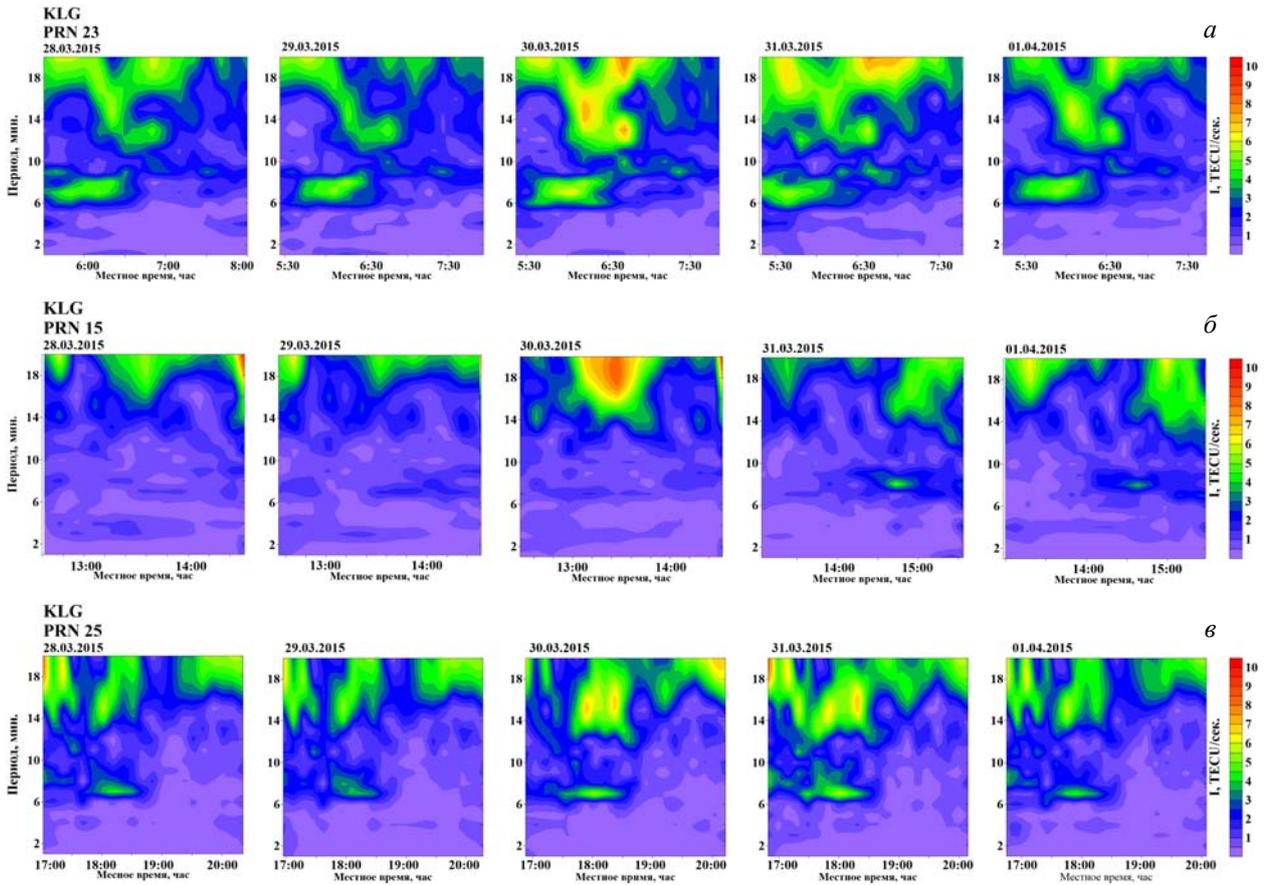


Рис. 2. Спектр вариаций  $F(t)$  по наблюдениям отдельных спутников GPS на ст. Калининград в период прохождения метеорологического шторма 29–30 марта 2015 г.: 6:00–10:00 LT (а); 13:00–17:00 LT (б); 18:00–21:00 LT (в)

вариаций ионосферы, рассматривались ряды наблюдений ПЭС на трассе спутник — станция приема, полученные в наблюдениях отдельных спутников GPS, в течение нескольких дней, включая дни метеорологического шторма. Время появления спутника над станцией и продолжительность его наблюдения слабо меняются от дня ко дню. Результаты таких наблюдений можно использовать для исследования причин изменения спектральных характеристик вариаций ионосферы в течение одного и того же периода местного времени на протяжении нескольких дней. Анализ различных спектров вариаций, определенных по данным полученным в различные дни, поможет более точно выделить особенности проявления метеорологических штормов в возмущениях ионосферы.

В работе процедуры спектрального анализа применялись к производным по времени от значений ПЭС, получаемого в наблюдениях и определяемых выражением

$$F(t) = \frac{G(t) - G(t - \tau)}{\tau},$$

где  $G(t)$  — значения ПЭС, определенные в момент времени  $t$ ,  $\tau$  — время между двумя последовательными наблюдениями. Сходные процедуры выделения спектров вариаций часто применяются в ионосферных исследованиях [Афраймович, Перевалова, 2006; Карпов и др., 2016б]. Для выявления динамики

спектров возмущений ионосферы в диапазоне периодов АГВ применялось оконное преобразование Фурье с длиной прямоугольного окна  $\sim 1$  ч.

На рис. 2 показаны спектры  $F(t)$ , полученные по наблюдениям отдельных спутников GPS наблюдавшихся на станции Калининград в течение 5 дней (включая день метеорологического шторма) в одно и то же местное время (утро, день, вечер).

Как видно из рисунков, спектральная структура ионосферных вариаций и ее динамика в течение наблюдений достаточно устойчива и слабо меняется от дня ко дню. В рассматриваемом частотном диапазоне основной вклад в вариации ионосферы в течение всех периодов наблюдений вносят гармоники с периодами  $\sim 14$ –20 мин. В утренние и вечерние часы (рис. 2, а, в) отмечается появление гармоник с периодами 6–8 мин, что, по-видимому, связано с прохождением солнечного терминатора. В день метеорологического шторма 30.03.2015 г. отмечается повышение амплитуд гармоник с периодами 6–8 мин и 14–20 мин (рис. 2). Эти повышения амплитуд гармоник достигают 30–50 % и сохраняются в течение суток после прохождения шторма.

В теоретических исследованиях процессов распространения АГВ в верхнюю атмосферу показывается, что процессы диссипации таких волн приводят к формированию локальных областей нагрева термосферы [Карпов, Кшевецкий, 2014]. Повышение температуры термосферы ведет к усилению ре-

комбинационных процессов в ионосфере. Можно предположить, что наблюдаемые продолжительные понижения значений ПЭС (рис. 1) в периоды метеорологических штормов обуславливаются формированием локальных областей нагрева термосферы вследствие диссипации АГВ, приходящих в верхнюю атмосферу из области метеорологического возмущения в нижней атмосфере. Таким образом, анализ наблюдений вариаций ПЭС показал, что в периоды метеорологических возмущений происходят существенные изменения спектров вариаций, которые проявляются в следующем:

1. В день метеорологического шторма в спектре вариаций ПЭС отмечается повышение амплитуд гармоник периодами 6–8 мин и 14–20 мин. Характерное время релаксации возмущений составляет ~1 сут.

2. Возможной причиной продолжительных понижений значений ПЭС в период метеорологического шторма являются процессы диссипации АГВ, распространяющихся из области метеорологического возмущения.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы повышения конкурентоспособности 5-100 БФУ им. И. Канта и гранта РФФИ № 15-05-01665.

## Список литературы

Афраймович Э.Л., Первалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: изд-во ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. 480 с.

Данилов А.Д., Казимировский Э.С., Вергасова Г.В., Хачикян Г.Я. Метеорологические эффекты в ионосфере. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 271 с.

Карпов И.В., Борчевкина О.П., Дадашев Р.З., Ильминская А.В. Влияние метеорологических штормов на параметры ионосферы в Балтийском регионе в 2010 г. // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2, № 2. С. 64–68.

Карпов И.В., Кшевецкий С.П. Механизм формирования крупномасштабных возмущений в верхней атмосфере от источников АГВ на поверхности Земли // Геомагнетизм и аэрономия. 2014. Т. 54, № 4. С. 553–562.

Карпов И.В., Кшевецкий С.П. и др. Возмущения верхней атмосферы и ионосферы, инициированные источниками акустико-гравитационных волн в нижней атмосфере // Химическая физика. 2016. Т. 35, № 1. С. 59–64.

Laštovichka J. Forcing of the ionosphere by waves from below // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2006. V. 68, N 3–5. P. 479–497.

Polyakova A.S., Perevalova N.P. Comparative analysis of TEC disturbances over tropical cyclone zones in the North-West Pacific Ocean // Adv. Space Res. 2013. V. 52, iss. 8. P. 1416–1426.

Rishbeth H. F-region links with the lower atmosphere // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2006. V. 68, N 3–5. P. 469–478.