

---

**ВЛИЯНИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ШТОРМОВ  
НА ПАРАМЕТРЫ ИОНОСФЕРЫ В БАЛТИЙСКОМ РЕГИОНЕ В 2010 г.**

**INFLUENCE OF METEOROLOGICAL STORMS  
ON IONOSPHERIC PARAMETERS IN THE BALTIC REGION IN 2010**

---

**И.В. Карпов**

*Западное отделение ИЗМИРАН,  
Калининград, Россия  
Балтийский федеральный университет имени И. Канта,  
Калининград, Россия, ivkarpov@inbox.ru*

**О.П. Борчевкина**

*Балтийский федеральный университет имени И. Канта,  
Калининград, Россия, opsuslova@gmail.com*

**Р.З. Дадашев**

*Балтийский федеральный университет имени И. Канта,  
Калининград, Россия, rusa1710@mail.ru*

**А.В. Ильминская**

*Балтийский федеральный университет имени И. Канта,  
Калининград, Россия, a.ilminskaya@mail.ru*

**I.V. Karpov**

*WD IZMIRAN,  
Kaliningrad, Russia  
I. Kant Baltic Federal University,  
Kaliningrad, Russia, ivkarpov@inbox.ru*

**O.P. Borchevkina**

*I. Kant Baltic Federal University,  
Kaliningrad, Russia, opsuslova@gmail.com*

**R.Z. Dadashev**

*I. Kant Baltic Federal University,  
Kaliningrad, Russia, rusa1710@mail.ru*

**A.V. Ilminskaya**

*I. Kant Baltic Federal University,  
Kaliningrad, Russia, a.ilminskaya@mail.ru*

**Аннотация.** Представлены результаты наблюдения параметров атмосферы и ионосферы в периоды сильных метеорологических возмущений (штормов) в Калининградской области. Наблюдения критической частоты F2-слоя ионосферы ( $f_oF2$ ) и полного электронного содержания (ПЭС) выполнены на ст. Калининград (20 °E, 54.20 °N). В качестве анализируемых атмосферных параметров рассматривались атмосферное давление и ветер. Показано, что в периоды метеорологических штормов как в дневное, так и в ночное время отмечаются понижения значений ПЭС до 50 % и  $f_oF2$  до 15 % по отношению к спокойным дням. Выявленные изменения состояния ионосферы во время метеорологических штормов отмечаются регулярно и являются характерным признаком метеорологического влияния на ионосферу.

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

**Abstract.** The paper presents observations of atmospheric and ionospheric parameters during strong meteorological disturbances (storms) in the Kaliningrad region. The critical frequency of the F2 layer ( $f_oF2$ ) and the total electron content (TEC) were observed at the station Kaliningrad (20 °E, 54.20 °N). Atmospheric pressure and wind were taken to be the atmospheric parameters under study. The analysis of ionospheric observations has shown that during meteorological storms the amplitude of diurnal variations in TEC decreases to 50 %; and in  $f_oF2$ , to 15 % as compared to quiet days. The revealed changes in ionospheric conditions during meteorological storms are regularly registered and represent a characteristic feature of the meteorological effect on the ionosphere.

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

**ВВЕДЕНИЕ**

Метеорологические процессы являются важным источником генерации акустико-гравитационных волн (АГВ) в атмосфере. По результатам многочисленных экспериментальных и теоретических исследований различные динамические процессы в нижней атмосфере и на поверхности Земли, связанные, например, с метеорологическими, сейсмологическими и другими событиями, оказывают существенное влияние на состояние ионосферы. Оценки этого влияния приведены в рабо-

тах [Altadill et al., 2001; Sauli, Boska, 2001a; Lastovicka, Sauli, 1999; Fritts, Alexander, 2003]. В частности, изменения структуры ионосферных вариаций в периоды метеорологических возмущений анализируются в работах [Chernigovskaya et al., 2015; Sauli, Boska, 2001b; Vadas, Liu, 2009; Sindelarova et al., 2009; Polyakova, Perevalova, 2013].

Сильные метеорологические штормы являются климатической особенностью Калининградского региона, что позволяет выделить изменения состояния ионосферы, обусловленные метеорологическими эффектами.

Цель настоящей работы заключается в исследовании возмущений ионосферных параметров, возникающих в периоды метеорологических штормов, и выявлении их характерных признаков по наблюдениям на ст. Калининград.

### СУТОЧНЫЕ ВАРИАЦИИ АТМОСФЕРНЫХ И ИОНОСФЕРНЫХ ПАРАМЕТРОВ В ПЕРИОД МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО ШТОРМА

Для исследования ионосферной динамики в условиях метеорологических возмущений были выбраны периоды, в течение которых отмечались наиболее сильные метеорологические штормы на территории Калининградской области.

Анализ ионосферных данных выполнен по наблюдениям критической частоты F2-слоя ( $f_oF2$ ) и полного электронного содержания (ПЭС) на ст. Калининград. Методики определения  $f_oF2$  по наблюдениям ионозонда «Парус» и ПЭС на основе анализа сигналов навигационных спутников ГНСС представлены в работах [Karpenko, Manaenkova, 1996; Vagan et al., 1997]. Данные о метеорологической обстановке получены в базе данных [www.rp5.ru].

Основное внимание уделено быстро развивающимся метеорологическим возмущениям, сопровождающимся сильными порывами ветра, достигающими 6–8 баллов по шкале Бофорта. Как правило, продолжительность таких штормов в Калининградском регионе не превышает двух дней. С целью выделения характерных особенностей ионосферных возмущений, возникающих в условиях метеорологических штормов, рассматривался период наблюдений  $\pm 5$  сут от даты шторма. В качестве анализируемых метеопараметров рассматривались суточные вариации атмосферного давления  $P_0$  на уровне станции и максимальных значений скорости ветра на высоте 10 м — параметр  $FF3$ , который измеряется каждые 3 ч на метеорологической станции. Для уменьшения влияния геомагнитных факторов на вариации параметров ионосферы выбирались метеорологические возмущения на фоне спокойных геомагнитных условий.

На рис. 1 показаны результаты наблюдений атмосферных и ионосферных параметров в период прохождения метеорологического шторма в декабре 2010 г. Геомагнитная обстановка 6–12 декабря была относительно спокойной с  $K_p \leq 3$ . Непосредственно в дни шторма 9–10 декабря значения  $K_p$  не превышали 1. Солнечная активность в этот период также оставалась спокойной,  $F10.7=84$ . Видно, что период пониженного атмосферного давления начался 4 декабря и продолжался по 12 декабря (рис. 1, а). Ветровой режим в приземной атмосфере характеризовался усилением порывов ветра на начальной фазе снижения атмосферного давления, что в наибольшей степени проявилось 9–10 декабря, когда скорость ветра достигала 13 м/с (рис. 1, б). Выделен-

ные периоды изменений метеопараметров отчетливо проявляются в вариациях параметров ионосферы. Так, 4–5 и 9–10 декабря отмечается понижение значений ПЭС (рис. 1, в), достигающее ~30–40 % для дневных и ~ 50 % для ночных условий в сравнении с метеоспокойными днями. В вариациях  $f_oF2$  (рис. 1, г)

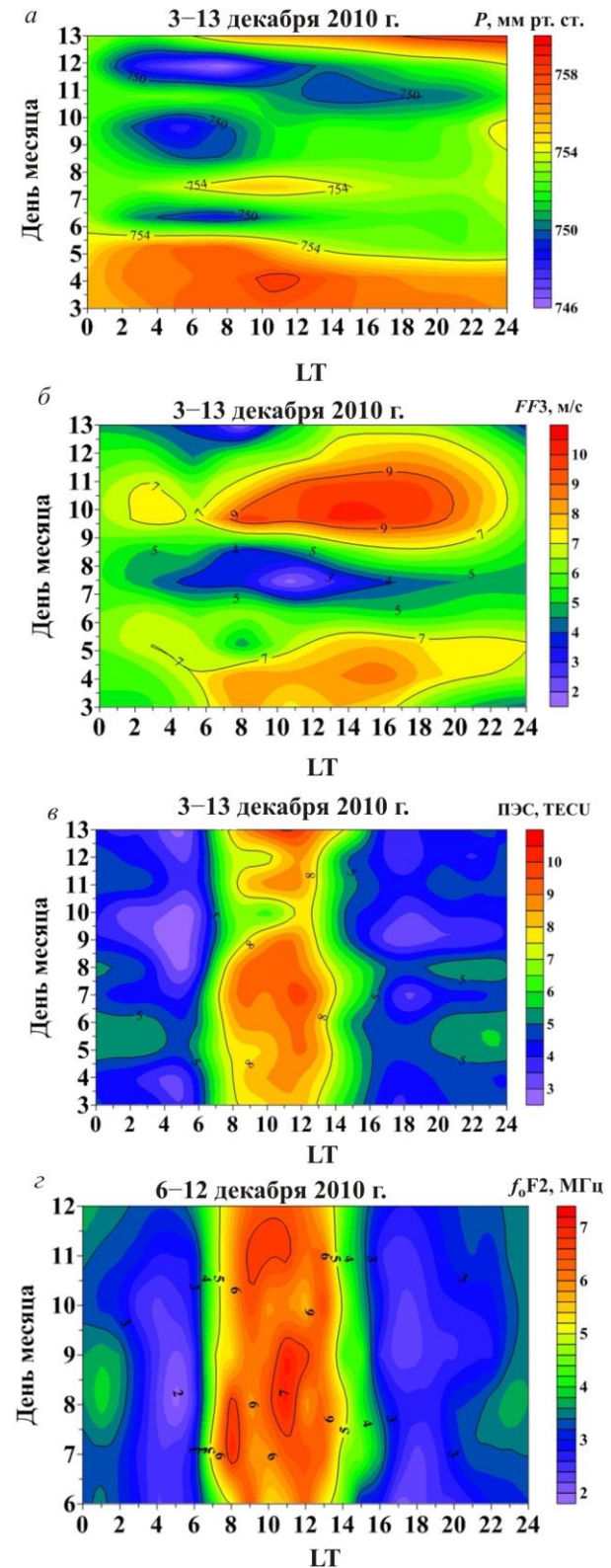


Рис. 1. Суточные вариации давления 3–13 декабря 2010 г. по наблюдениям на ст. Калининград (а); суточные вариации скорости ветра (б); суточные вариации ПЭС (в); суточные вариации  $f_oF2$  6–12 декабря 2010 г. (г)

изменения менее выражены, однако в день шторма понижение достигает ~15 %.

На рис. 2 показаны вариации атмосферных и ионосферных параметров в период метеорологического возмущения 18 августа 2010 г. Отметим, что летом штормовые метеоусловия в Калининградском регионе отмечаются значительно реже. Геомагнитные условия 13–23 августа были спокойные с  $K_p \leq 3$ . Солнечная активность слабо менялась, понижаясь от  $F_{10.7} = 86$  13 августа до  $F_{10.7} = 76$  23 августа.

Видно, что атмосферное давление начало понижаться 14 августа, достигло минимальных значений в день шторма 18 августа, и стало повышаться 20 декабря (рис. 2, а). Ветровой режим в период наблюдений характеризовался усилением скорости ветра главным образом в дневное время 18–19 августа с максимальным значением ~14 м/с 19 августа. Возмущения ПЭС и  $f_oF_2$ , как видно из рис. 2 в, з, отчетливо проявились 14 и 18 августа (белым цветом на рис. 2, з отмечены участки наблюдений, в которых не удалось определить значение критической частоты из-за сильного поглощения в E- и D-областях ионосферы). Понижение дневных значений ПЭС в этот период достигает ~30–40 % по отношению к предыдущим метеоспокойным дням, а для критической частоты — ~15–20 %.

В наблюдениях 2008–2010 гг. было выделено восемь метеорологических штормов, которые протекали на фоне спокойных геомагнитных условий. Анализ результатов ионосферных наблюдений показал, что понижения электронной концентрации в ионосфере, аналогичные показанным на рис. 1, 2, наблюдаются устойчиво. Поскольку для анализа ионосферных возмущений отбирались только спокойные по геомагнитным факторам периоды, можно предположить, что причиной такой реакции ионосферы являются возмущения атмосферных параметров в период метеорологического шторма. Однако представленные в работе данные о вариациях атмосферного давления и изменении ветрового режима, по-видимому, не исчерпывают набор метеорологических параметров, характеризующих штормовые условия и предопределяющих реакцию ионосферы. Можно отметить, что в условиях зимнего шторма (рис. 1) реакция ионосферы в большей степени отражала динамику ветрового режима, а в летних условиях (рис. 2) — динамику давления.

Изучение связей метеорологических и ионосферных процессов является сложной задачей и предполагает продолжение исследований с целью выделения метеорологических факторов, определяющих эти связи.

Можно также отметить, что ионосферная реакция на возмущение ветра (рис. 1) или давления (рис. 2) возникает достаточно быстро, в течение нескольких (~3–6) часов. Естественно предположить, что наиболее вероятным переносчиком энергии метеорологического возмущения в верхнюю атмосферу являются АГВ. Экспериментальные наблюдения вол-

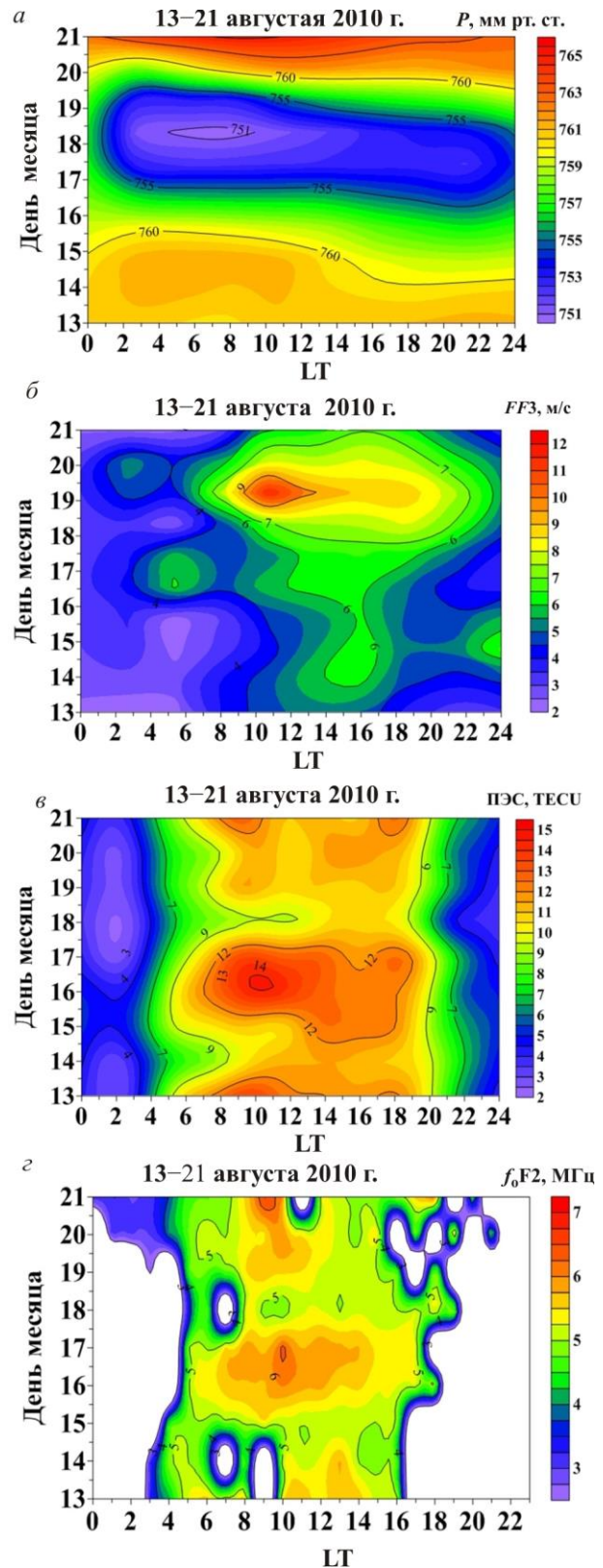


Рис. 2. Суточные вариации приземного атмосферного давления (а); суточные вариации скорости ветра (б); суточные вариации ПЭС (в); суточные вариации  $f_oF_2$  (з) в период 13–21 августа 2010 г. по наблюдениям на ст. Калининград

новых вариаций ионосферы в периоды усиления циклонической активности выявляют в наблюдениях ПЭС вариации с периодами инфразвуковых и грави-

тационных волн (2–20 мин) [Polyakova, Perevalova, 2013]. Можно предположить, что быстрые изменения метеорологической обстановки в условиях шторма создают благоприятные условия для возбуждения АГВ в широком диапазоне периодов. Распространение АГВ в верхнюю атмосферу и их диссипация вызывают наблюдаемые возмущения ионосферы. Теоретические исследования процессов распространения АГВ от источников в нижней атмосфере показывают, что волны этого диапазона способны быстро достигать верхней атмосферы и вследствие диссипации формировать крупномасштабные возмущения и, в частности, локальные области нагрева. Заметные крупномасштабные возмущения верхней атмосферы, обусловленные диссипацией АГВ, распространяющихся от источников в нижней атмосфере, отмечаются через 1–2 ч после начала работы источника [Карпов, Кшевецкий, 2014]. Появление области локального нагрева в верхней атмосфере должно влиять на ионизационный баланс в ионосфере и приводить к понижению электронной концентрации в ионосфере вследствие усиления влияния рекомбинационных процессов.

## ВЫВОДЫ

Анализ результатов проведенных в Калининграде наблюдений ионосферных параметров показал, что в периоды метеорологических штормов отмечаются существенные понижения ПЭС и критической частоты F-слоя, особенно заметные в дневное время. Понижение ПЭС по отношению к метеорологически спокойным дням может достигать 50 %, а для  $f_oF_2$  — ~15 %. В периоды метеорологических штормов такие ионосферные возмущения отмечаются устойчиво, что позволяет рассматривать их как характерные признаки возмущений, инициируемых метеорологическими процессами.

Ионосферные возмущения развиваются достаточно быстро, в течение нескольких часов после возмущений метеорологической обстановки. Можно предположить, что физические механизмы, реализующие эту связь, связаны с распространением АГВ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ № 15-05-01665) и проектной части государственного задания Министерства образования и науки РФ № 3.1127.2014/К.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Карпов И.В., Кшевецкий С.П. Механизм формирования крупномасштабных возмущений в верхней атмосфере от источников АГВ на поверхности Земли // Геомагнетизм и аэронавигация. 2014. Т. 54, № 4. С. 553–562. DOI: 10.7868/S001679401404018X.

Altadill D., Apostolov E.M., Solé J.G., Jacobi Ch. Origin and development of vertical propagating oscillations with periods of planetary waves in the ionospheric F region // *Physics and Chemistry of the Earth. Part C: Solar, Terrestrial & Planetary Science*. 2001. V. 26, iss. 6. P. 387–393. DOI: 10.1016/S1464-1917(01)00019-8.

Baran L.W., Shagimuratov I.I., Tepenitzina N.J. The Use of GPS for Ionospheric Studies // *Artificial satellites. J. Planetary Geodesy*. 1997. V. 32, N 1. P. 49–60.

Chernigovskaya M.A., Shpynev B.G., Ratovsky K.G. Meteorological effects of ionospheric disturbances from vertical radio sounding data // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2015. V. 136. P. 235–243. DOI: 10.1016/j.jastp.2015.07.006.

Fritts D.C., Alexander M.J. Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere // *Rev. Geophys.* 2003. V. 41, iss.1. P. 3–64. DOI: 10.1029/2001RG000106.

Karpenko A.L., Manaenkova N.I. Nonlinear time series analysis of the ionospheric measurements // *Geologische Rundschau*. 1996. V. 85, N 1. P. 124–129.

Lastovicka J., Sauli P. Are planetary wave type oscillations in the F2 region caused by planetary wave modulation of upward propagating tides? // *Adv. Space Res.* 1999. V. 24, iss. 11. P. 1473–1476. DOI: 10.1016/S0273-1177(99)00708-5.

Polyakova A.S., Perevalova N.P. Comparative analysis of TEC disturbances over tropical cyclone zones in the north-west Pacific ocean // *Adv. Space Res. (including COSPAR Information Bulletin)*. 2013. V. 52, iss. 8. P. 1416–1426. DOI: 10.1016/j.asr.2013.07.029.

Sauli P., Boska J. Observations of gravity waves of meteorological origin in the F-region ionosphere // *Physics and Chemistry of the Earth. Part C: Solar, Terrestrial & Planetary Science*. 2001a. V. 26, iss. 6. P. 425–428. DOI: 10.1016/S1464-1917(01)00024-1.

Sauli P., Boska J. Tropospheric events and possible related gravity wave activity effects on the ionosphere // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2001b. V. 63, iss. 9. P. 945–950. DOI: 10.1016/S1364-6826(00)00205-4.

Sindelarova T., Buresova D., Chum J., Hruska F. Doppler observations of infrasonic waves of meteorological origin at ionospheric heights // *Adv. Space Res.* 2009. V. 43. P. 1644–1651. DOI: 10.1016/j.asr.2008.08.022; 2009.

Vadas S.L., Liu H.-L. Generation of large-scale gravity waves and neutral winds in the thermosphere from the dissipation of convectively generated gravity waves // *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2009. V. 114. A10310. DOI: 10.1029/2009JA014108.

URL: <http://www.rp5.ru> (accessed December 8, 2015)

## REFERENCES

Altadill D., Apostolov E.M., Solé J.G., Jacobi Ch. Origin and development of vertical propagating oscillations with periods of planetary waves in the ionospheric F region. *Physics and Chemistry of the Earth. Part C: Solar, Terrestrial & Planetary Science*. 2001, vol. 26, iss. 6, pp. 387–393. DOI: 10.1016/S1464-1917(01)00019-8.

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.

Chernigovskaya M.A., Shpynev B.G., Ratovsky K.G. Meteorological effects of ionospheric disturbances from vertical radio sounding data. *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2015, vol. 11, iss. 22, pp. 235–243. DOI: 10.1016/j.jastp.2015.07.006.

Fritts D.C., Alexander M.J. Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere. *Rev. Geophys.* 2003, vol. 41, iss.1, pp. 3–64. DOI: 10.1029/2001RG000106.

Karpenko A.L., Manaenkova N.I. Nonlinear time series analysis of the ionospheric measurements *Geologische Rundschau*. 1996, vol. 85, no. 1. pp. 124–129.

Karpov I.V., Kshevetskii S.P. Mechanism of formation of large scale disturbances in the upper atmosphere from AGW sources on Earth's surface. *Geomagnetizm i Aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 2014, vol. 54, no. 4, pp. 553–562. DOI: 10.1134/S0016793214040173 (in Russian).

Lastovicka J., Sauli P. Are planetary wave type oscillations in the F2 region caused by planetary wave modulation of upward propagating tides? *Adv. Space Res.* 1999, vol. 24, iss. 11, pp. 1473–1476. DOI: 10.1016/S0273-1177(99)00708-5.

Polyakova A.S., Perevalova N.P. Comparative analysis of TEC disturbances over tropical cyclone zones in the north-west Pacific ocean. *Adv. Space Res. (including COSPAR Information Bulletin)*. 2013. vol. 52, iss. 8, pp. 1416–1426. DOI: 10.1016/j.asr.2013.07.029.

Sauli P., Boska J. Observations of gravity waves of meteorological origin in the F-region ionosphere. *Physics and Chemistry of the Earth. Part C: Solar, Terrestrial & Planetary Science*. 2001a, vol. 26, iss. 6, pp. 425–428. DOI: 10.1016/S1464-1917(01)00024-1.

Sauli P., Boska J. Tropospheric events and possible related gravity wave activity effects on the ionosphere. *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2001b, vol. 63, iss. 9, pp. 945–950. DOI: 10.1016/S1364-6826(00)00205-4.

Sindelarova T., Buresova D., Chum J., Hruska F. Doppler observations of infrasonic waves of meteorological origin at ionospheric heights. *Adv. Space Res.* 2009, vol. 43, pp. 1644–1651. DOI: 10.1016/j.asr.2008.08.022; 2009.

Vadas S.L., Liu H.-L. Generation of large-scale gravity waves and neutral winds in the thermosphere from the dissipation of convectively generated gravity waves. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2009, vol. 114, A10310. DOI: 10.1029/2009JA014108.

URL: <http://www.rp5.ru> (accessed December 8, 2015)