

**О. П. Борчевкина, Ю. А. Курдяева, М. И. Карпов
Б. В. Чубаренко, Д. А. Домнин, Н. А. Коренькова, И. В. Карпов**

ЭФФЕКТЫ ШТОРМОВЫХ ЯВЛЕНИЙ В БАЛТИЙСКОМ МОРЕ НА ВЕРХНЮЮ АТМОСФЕРУ

Представлены результаты наблюдений параметров ионосферы, выполненных в Калининграде (54° N, 20° E) в период метеорологического шторма в Балтийском море в октябре 2018 г. Анализ вариаций ионосферы показал, что в период шторма увеличение полного электронного содержания достигало 20 % относительно осредненных величин, а увеличение критической частоты F2-слоя – 19 %. Также выявлено повышение амплитуд вариаций ионосферы с периодами 6–20 мин над областью метеорологического шторма. Результаты численного эксперимента по возмущению верхней атмосферы вследствие наблюдаемых вариаций приземного давления также показали усиление волновой активности с периодами ~15 мин и формирование крупномасштабного возмущения на высотах термосферы.

The paper presents the results of observations the ionospheric parameters in Kaliningrad (54° N, 20° E) during a meteorological storm in the Baltic sea on October 2018. The analysis of ionospheric variations showed the increase in the total electron content reached 20 % relative to the averaged values, and the increase in the critical frequency of the F2 layer was 19 % during the storm. The increase in the amplitudes of ionospheric variations with periods of 6–20 min over the area of a meteorological storm was also revealed. The results of the numerical experiment on the disturbance of the upper atmosphere due to the observed variations in surface pressure also showed an increase in wave activity with periods of ~15 min and the formation of a large-scale disturbance at the heights of the thermosphere.

Ключевые слова: метеорологическое возмущение, ионосфера, полное электронное содержание, системы глобального позиционирования, математическое моделирование, дистанционное зондирование.

Keywords: meteorological storm, ionosphere, total electron content, global positioning system, mathematical modeling, remote sensing.

Введение

В исследованиях влияния динамических процессов в нижней атмосфере на состояние и изменчивость верхней атмосферы и ионосферы большое внимание уделяется изучению характеристик волн, возникающих в условиях сильных метеорологических возмущений. Экспериментальные исследования состояния и динамики ионосферы над областями развития особо экстремальных метеорологических событий, таких как ураганы и тайфуны, демонстрируют формирование различного рода эффектов, в том числе перемещающихся ионосферных возму-



щений (ПИВ), возмущений электрического поля, полного электронного содержания (ионосферный параметр ТЕС), возникновение оптических эмиссий, явлений F-рассеивания и пр. [1–5].

Во время масштабных метеорологических событий на средних широтах в спокойных гелиогеофизических условиях, когда воздействие на ионосферу сверху минимально, отмечается изменение параметров нейтральной атмосферы и ионосферы на 20 % и более [6; 7]. Ионосферные возмущения возникают достаточно быстро, спустя несколько часов после начала метеорологического возмущения, что указывает на волновую природу процессов, реализующих связи явлений в различных слоях атмосферы. Наибольший интерес в исследованиях механизмов формирования ионосферных возмущений в таких явлениях представляют акустико-гравитационные волны (АГВ) [8; 9]. Такие волны способны переносить энергию из области возмущений в нижней атмосфере до высот ионосферы, влиять на локальную электронную плотность посредством ион-нейтральных столкновений, приводя к возникновению ионосферных возмущений и ПИВ [10]. В свою очередь, возникновение ионосферных неоднородностей оказывает влияние на устойчивость функционирования систем связи в различных частотных диапазонах, глобальных навигационных спутниковых систем (GNSS).

В настоящей работе представлены результаты наблюдений и анализ вариаций ионосферы во время метеорологического события в Балтийском море в октябре 2018 г.

Методы и результаты наблюдений

Для описания метеорологической обстановки использовались трехчасовые измерения максимальных значений порывов ветра, а также атмосферного давления, приведенного к среднему уровню моря (<http://www.rp5.ru>). В качестве данных для анализа отклика ионосферы использовались часовые измерения критической частоты F2-слоя ионосферы (foF2, МГц), характеризующей максимум в вертикальном профиле электронной концентрации по данным ионозонда «Парус-А» Калининградского филиала ИЗМИРАН (54° N, 20° E), а также осредненные за 10-минутный интервал измерения полного электронного содержания (ионосферный параметр ТЕС) по данным приемника сигналов GPS. В качестве дополнительного источника данных использовались измерения метеорологической станции в Ольштыне (53° N, 20° E), Польша (часовые измерения), а также станции International GNSS Service LAMA (53.7° N, 20.6° E). Для анализа возмущений foF2 и ТЕС были определены отклонения данных величин относительно скользящей медианы, отцентрированной на день рассматриваемого дня, с окном 13 суток до и после рассматриваемого момента времени.

На рисунке 1 представлены измерения атмосферного давления, максимальных порывов ветра, индексов геомагнитной активности Kp и Dst, а также данные ТЕС и foF2 в Калининграде и Ольштыне с 21 по



26 октября 2018 г. К середине 23 октября в Калининграде и Ольштыне приземное атмосферное давление опустилось ниже 750 мм. рт. ст., скорость ветра превысила 17 м/с и на следующий день достигла 20 м/с, что соответствует 8 баллам по шкале Бофорта. В ночь на 24 октября наблюдался рост электронной концентрации, и к 09:00 UT увеличение ТЕС достигло 20 % относительно осредненных величин, что соответствовало 2,4 стандартного отклонения σ . Увеличение критической частоты F2-слоя составило 19 %, или 1,6 σ .

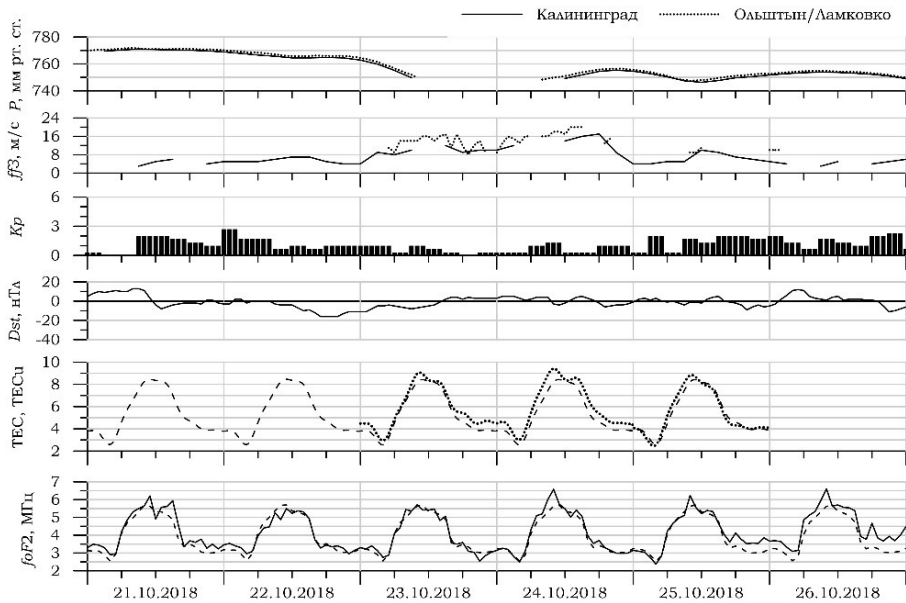


Рис. 1. Измерения атмосферного давления P , максимальных порывов ветра $ff3$, индексов геомагнитной активности K_p и Dst , а также ТЕС в Ольштыне и $foF2$ в Калининграде 21-26 октября 2018 г. Пунктирными линиями указаны медианные значения ТЕС и $foF2$.

Для определения частотных характеристик вариаций параметров ионосферы над областью метеорологического возмущения применялись методы вейвлет-анализа к данным наблюдений полного электронного содержания, определенных по сигналам пролетных спутников GPS. Методы вейвлет-анализа широко применяются для обработки и анализа нестационарных во времени и неоднородных в пространстве сигналов [11; 12]. Результаты такого анализа позволяют получить информацию о распределении энергии в спектре сигнала и сведения о времени появления определенных частотных составляющих. При вейвлет-преобразовании одномерных сигналов частота и время рассматриваются как независимые переменные, что позволяет получать сведения о временной эволюции сигнала.

Коэффициенты вейвлет-преобразования вычисляются следующим образом:



$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (1)$$

где $x(t)$ – случайный процесс; $\psi(t)$ – выбранный анализирующий вейвлет; b – параметр сдвига.

При вычислении вейвлет-коэффициентов нерегулярных процессов методом прямоугольников выражение (1) преобразуется к следующему виду:

$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \sum_{k=0}^{N-2} (t_{k+1} - t_k) x_k \psi_k\left(\frac{t_k - b}{a}\right), \quad (2)$$

где N – число отсчетов реализации неэквилидистантного временного ряда.

В настоящем исследовании был выбран комплексный вейвлет Морле

$$\psi = e^{ia\omega t} e^{-\frac{t^2}{2}}.$$

Использование данных ТЕС пролетных спутников дает возможность выделять на фоне регулярных и нерегулярных возмущающих факторов в возмущения в ионосфере на основе точных фазовых измерений [13]. Данные имеют временное разрешение 30 с, что позволяет исследовать различные периодичности сигнала.

На рисунке 2 представлены периодограммы полного электронного содержания, полученные по наблюдениям сигналов спутника PRN 22 над станцией VIS0 (57.5° N, 18.4° E) 22–28 октября 2018 г. Пороговое значение угла места Солнца для анализа отклика ионосферы на метеорологические возмущения в тропосфере было определено равным 20°. В анализе наблюдений основное внимание уделялось выделению вариаций ТЕС с периодами 2–20 мин. АГВ с такими периодами распространяются практически вертикально из области возмущений в тропосфере.

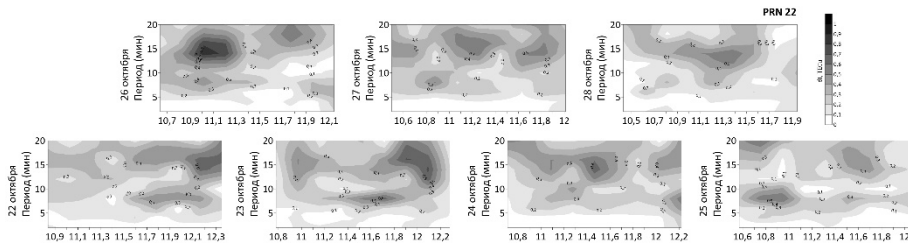


Рис. 2. Спектры вариаций ТЕС 22–28 октября 2018 г. на станции VIS0

Как видно из рисунка 2, дни метеорологического возмущения в тропосфере сопровождаются усилением амплитуд вариаций ТЕС с периодами 6–10 и 12–18 мин 25–26 октября. Такое увеличение может быть связано с увеличением активности АГВ, распространяющихся из области метеорологического шторма.

Таким образом, результаты анализа вариаций ТЕС показывают усиление волновой активности АГВ с периодами ~6-20 мин в периоды метеорологического шторма в 25–26 октября 2018 г.

Моделирование

Для оценки влияния на верхнюю атмосферу АГВ, возбуждаемых в тропосфере в период метеорологического шторма, был выполнен численный эксперимент с применением численной модели генерации и распространения АГВ Atmosym [14]. Методика проведения численного эксперимента с использованием в качестве источника возмущений наблюдаемых вариаций приземного давления представлена в [15; 16].

В проведенном численном эксперименте по исследованию возмущений верхней атмосферы в Балтийском регионе от метеорологических источников были использованы двухминутные данные изменения температуры в Балтийском море. Данные были приведены к вариациям давления и использованы в качестве нижнего граничного условия в модельных расчетах. Область интегрирования уравнений модели составляла 2000 км в горизонтальном направлении и 500 км — по вертикали.

Возмущения атмосферного давления на нижней границе модели воспроизводили условия, в которых вариации давления в области с $x < 1000$ км определялись по данным, полученным над водной поверхностью, а в области с $x > 1000$ км — по наблюдениям на суше. Модельный источник движется от начала левой границы расчетной области до середины (1000 км) и продолжает работать на этом участке все оставшееся время. На рисунке 3 показаны пространственные распределения волновых возмущений температуры в верхней атмосфере от источника в нижней атмосфере.

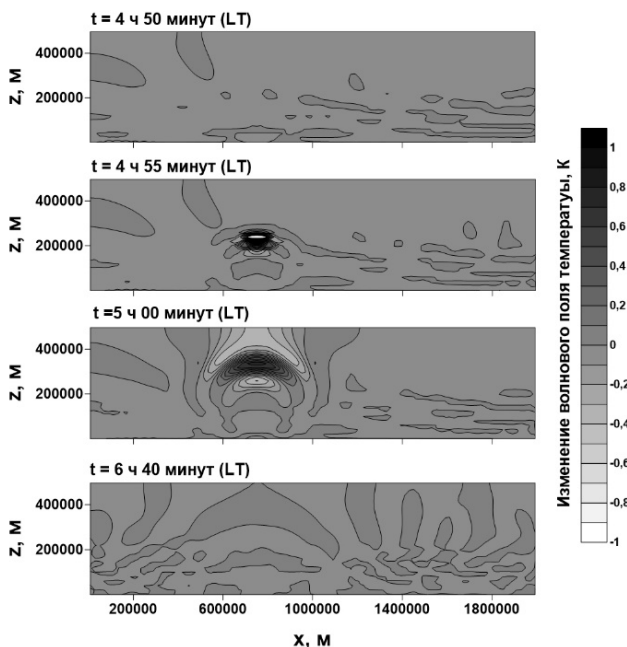


Рис. 3. Волновые возмущения температуры в верхней атмосфере от наземного источника АГВ



Результаты расчетов показали, что такой источник генерирует в основном инфразвуковые волны с малыми амплитудами. На фоне резкого понижения давления около 5 часов утра по местному времени наблюдается резкое увеличение температуры, которое можно ассоциировать с приходом внутренних гравитационных волн с периодом более 15 мин. Волновая добавка, показанная на рисунке 3, превышает значения, соответствующие спокойным метеорологическим условиям [17], почти в 2 раза. Поскольку используемые данные о вариациях давления получены косвенным методом, реальный нагрев атмосферы может быть существенно выше. Эффекты, вызванные распространением этих волн, держатся в верхней атмосфере около 1,5 ч. Предполагаемые физические механизмы возмущений верхней атмосферы подробно описаны в [17; 18].

Заключение

Анализ наблюдений атмосферных и ионосферных параметров в период развития метеорологического шторма на Балтике в октябре 2018 г. показал, что быстрые изменения скорости ветра и приземного давления ведут к увеличению ТЕС до 2,4 стандартного отклонения и критической частоты F2-слоя до 1,6 стандартного отклонения непосредственно над областью метеорологических возмущений. Изменение скорости ветра определяется неустойчивым состоянием атмосферы и характеризует процессы возбуждения атмосферных волн.

В условиях метеорологических штормов усиливаются процессы возбуждения АГВ в нижней атмосфере. Распространение таких волн в верхнюю атмосферу приводит к формированию возмущений состояния термосферы на пространственных масштабах, определяемых длительностью и пространственными размерами области, находящейся в зоне метеорологического возмущения. Появление таких областей влияет на циркуляцию и электродинамические процессы в термосфере и ионосфере локальным ионосферным возмущениям, проявляющимся в изменениях ионосферных параметров. Модельное исследование результатов распространения АГВ от наземных источников подтверждают предполагаемые физические механизмы влияния метеорологических штормов на верхнюю атмосферу и ионосферу.

Благодарности. Авторы выражают благодарность International GNSS Service за доступ к данным ГНСС и сервису OMNIWeb Plus NASA / Goddard Space Flight Center за данные геомагнитных индексов, использованные в настоящем исследовании.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Калининградской области, грант №19-45-390005 («Влияние штормовых явлений в прибрежной зоне Балтийского моря на атмосферу и ионосферу в Калининградской области»).

Список литературы

1. Martinis C.R., Manzano J.R. The influence of active meteorological systems on the ionosphere F region // Ann. Geofisica. 1999. Vol. 42, iss. 1. P. 1–7.



2. 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. Vol. 52. P. 1416–1426.

3. 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. Vol. 136. P. 235–243.

4. Chou M. Y., Lin C. C. H., Yue J. et al. Concentric traveling ionosphere disturbances triggered by Super Typhoon Meranti // *Geophys. Res. Lett.* 2017. Vol. 44, iss. 3. P. 1219–1226.

5. Li W., Yue J., Yang Y. et al. Analysis of ionospheric disturbances associated with powerful cyclones in East Asia and North America // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2017. Vol. 161. P. 43–54.

6. Черниговская М. А., Сутырина Е. Н., Ратовский К. Г. Метеорологические эффекты ионосферной возмущенности над Иркутском по данным вертикального радиозондирования // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2014. Т. 11, №2. С. 264–274.

7. Борчевкина О. П., Карпов И. В. Ионосферные неоднородности в периоды метеорологических возмущений // *Геомагнетизм и аэрономия.* 2017. Т. 57, №5. С. 670–675.

8. Azeem I., Barlage M. Atmosphere-ionosphere coupling from convectively generated gravity waves // *Adv. Space Res.* 2018. Vol. 61, iss. 7. P. 1931–1941.

9. Yiğit E., Koucká Knížová P., 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 // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.* 2016. Vol. 141. P. 1–12.

10. Hocke K., Schlegel K. A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982–1995 // *Annales Geophysicae.* 1996. Vol. 14. P. 917–940.

11. Захаров В. И., Зиенко А. С. Методика статистического анализа вейллет-спектров ионосферных сигналов системы GPS // *Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия.* 2007. №2. С. 44–49.

12. Астафьева Н. М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // *Успехи физических наук.* 1996. Т. 166, №11. С. 1145–1170.

13. Davies K., Hartmann G. K. Studying the ionosphere with global positioning system // *Radio Sci.* 1997. Vol. 32. P. 1695–1698.

14. Gavrilov N. M., Kshevetskii S. P. Numerical modeling of propagation of breaking nonlinear acoustic-gravity waves from the lower to the upper atmosphere // *Advances in Space Research (includes Cospas Information Bulletin).* 2013. Vol. 51, iss. 7. P. 1168–1174.

15. Kurdyayeva Y., Kulichkov S., Kshevetskii S. et al. Propagation to the upper atmosphere of acoustic-gravity waves from atmospheric fronts in the Moscow region // *Ann. Geophys.* 2019. Vol. 37. P. 447–454.

16. Kurdyayeva Yu. A., Kshevetskii S. P., Gavrilov N. M., Kulichkov S. N. Correct Boundary Conditions for the High-Resolution Model of Nonlinear Acoustic-Gravity Waves Forced by Atmospheric Pressure Variations // *Pure and Applied Geophysics.* 2018. Vol. 175, iss. 10. P. 3639–3652.

17. Карпов И. В., Кшевецкий С. П., Борчевкина О. 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.

18. Карпов И. В., Борчевкина О. П., Карпов М. И. Локальные и региональные возмущения ионосферы в периоды метеорологических возмущений // *Геомагнетизм и аэрономия.* 2019. Т. 59, №4. С. 492–500.



Об авторах

Ольга Павловна Борчевкина — канд. физ.-мат. наук, мл. науч. сотр., Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН); науч. сотр., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: olgaborchevkina@gmail.com

Юлия Андреевна Курдяева — мл. науч. сотр., Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Россия.

E-mail: yakurdyeva@gmail.com

Иван Викторович Карпов — д-р физ.-мат. наук, ведущ. науч. сотр., Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН); проф., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: ivkarpov@inbox.ru

Михаил Иванович Карпов — канд. физ.-мат. наук, науч. сотр., Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН); инженер-исследователь, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: mikhailkarpov@hotmail.com

Борис Валентинович Чубаренко — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., Атлантическое отделение Института океанологии РАН, Россия.

E-mail: chuboris@mail.ru

Дмитрий Александрович Домнин — канд. геогр. наук, науч. сотр., Атлантическое отделение Института океанологии РАН, Россия.

E-mail: dimanisha@gmail.com

Нина Алексеевна Коренькова — ст. науч. сотр., Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Россия.

E-mail: wdizmiran@gmail.com

The authors

Dr Olga P. Borchevkina, Junior Research Fellow, Kaliningrad Branch of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences; Research Fellow, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: olgaborchevkina@gmail.com

Yuliya A. Kurdyeva, Junior Research Fellow, Kaliningrad Branch of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences, Russia.

E-mail: yakurdyeva@gmail.com



Prof. Ivan V. Karpov, Leading Research Fellow, Kaliningrad Branch of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences; Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: ivkarpov@inbox.ru

Prof. Mikhail I. Karpov, Leading Research Fellow, Kaliningrad Branch of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences; Research Engineer, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: mikhailkarpov@hotmail.com

Dr Boris V. Chubarenko, Senior Research Fellow, Atlantic Branch of the Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Russia.

E-mail: chuboris@mail.ru

Dr Dmitry A. Domnin, Research Fellow, Atlantic Branch of the Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Russia.

E-mail: dimanisha@gmail.com

Nina A. Korenkova, Senior Research Fellow, Kaliningrad Branch of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences, Russia.

E-mail: wdizmiran@gmail.com