

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ ИОНОСФЕРЫ ВО ВРЕМЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО ВОЗМУЩЕНИЯ В ДЕКАБРЕ 2010 г.

© 2019 г. И. В. Карпов^{1,2*}, М. И. Карпов^{1,2}, О. П. Борчевкина^{1,2},
Г. А. Якимова¹, Н. А. Коренькова¹

¹Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова Российской академии наук, Калининград, Россия

²Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия

*E-mail: ivkarpov@inbox.ru

Поступила в редакцию 15.02.2019;

после доработки 10.03.2019;

принята в печать 20.03.2019

В работе представлены результаты наблюдений динамики параметров атмосферы и ионосферы, выполненных в период прохождения метеорологического шторма над Калининградским регионом в декабре 2010 г. Анализ наблюдений показал, что ионосферные неоднородности на средних широтах, возникающие в периоды метеорологических возмущений, проявляются в понижении амплитудных значений полного электронного содержания (total electron content (TEC)) и критической частоты F2-слоя на 33% и 15% соответственно. Показано, что метеорологические возмущения среднеширотной атмосферы могут проявляться в ионосфере и в приэкваториальных широтах в виде повышенных значений TEC, что указывает на сложный характер физических процессов, определяющих связи динамических процессов в нижней и верхней атмосфере.

Ключевые слова: метеорологическое возмущение, ионосфера, полное электронное содержание, акустико-гравитационные волны, вертикальное зондирование, глобальные навигационные спутниковые системы, реанализ.

DOI: 10.1134/S0207401X19070069

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее важные факторы, воздействующие на состояние ионосферы, связаны с солнечной и геомагнитной активностью. Однако влияние процессов в нижней атмосфере (от так называемых метеорологических источников) на состояние и динамику верхней атмосферы нельзя недооценивать. Так, по оценкам, сделанным в работах [1, 2], вклад таких источников составляет порядка 15–30% от всех факторов изменчивости ионосферы при спокойной геомагнитной обстановке. Современные экспериментальные исследования показывают, что активные динамические процессы в нижней атмосфере, такие как прохождение атмосферных фронтов, развитие метеорологических штормов, тропических циклонов, тайфунов, ураганов, струйных течений и т.д., вызывают разнообразные ионосферные эффекты. К ним относятся перемещающиеся ионосферные возмущения, возмущения электрического поля, полного электронного содержания (total electron content (TEC)), возникновение оптических эмиссий, явлений F-рассеивания и другие процессы [3–8].

Менее экстремальные метеорологические явления, чем тайфуны и ураганы, также представляют интерес при исследовании их влияния на вариации параметров ионосферы. Так, в работе [9] выявлены изменения критических частот F2-слоя в период сильного понижения атмосферного давления в Московском регионе. Отклонения f_oF2 (критической частоты F2-слоя ионосферы) составили 10–15% относительно медианных значений и были как отрицательными (днем), так и положительными (ночью). В работах [10–13] проанализированы несколько метеорологических событий, произошедших в Калининградской области. Во время усилений приземного ветра до 6–9 баллов по шкале Бофорта были зарегистрированы значительные уменьшения f_oF2 и TEC, достигающие 30% и 50% соответственно.

Теоретические представления о генерации ионосферных возмущений, вызванных развитием метеорологических процессов, основываются на возможности генерации акустико-гравитационных волн в области их возмущения, вертикального распространения и диссипации на высотах термосферы [14–17]. Теоретические оценки эф-

фектов диссипации акустико-гравитационных волн подтверждают возможность существенного влияния процессов диссипации таких волн на состояние термосферы и ионосферы [18–21].

В представленной работе приведены результаты наблюдений динамики параметров атмосферы и ионосферы, выполненных в декабре 2010 г. в период мощного метеорологического возмущения, развивавшегося над европейским регионом. Результаты анализа ионосферных возмущений позволяют оценить сложность процессов в ионосфере, инициированных развитием метеорологических возмущений.

МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В настоящей работе приведены результаты наблюдений динамики ионосферного параметра ТЕС, определяющего количество электронов в ионосфере и рассчитанного по фазовым задержкам сигналов спутников глобальных навигационных спутниковых систем, а также часовых измерений f_oF2 , выполненных на ст. Калининград (54° N , 20° E) в период метеорологических возмущений в декабре 2010 г. Для анализа вариаций атмосферных параметров в этот период использовались трехчасовые метеорологические данные с сайта www.rp5.ru. Пространственно-временные вариации атмосферного давления и ТЕС над указанным регионом исследованы по данным реанализа MERRA-2 (The Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications version 2), доступным с временным разрешением 1 ч и пространственным разрешением 0.5° и 0.625° по широте и долготе соответственно [22]. Для исследования пространственных масштабов ионосферного возмущения анализировались глобальные карты ТЕС по данным IGS (International GNSS Service) с разрешением 2.5° и 5° по широте и долготе соответственно [23].

На рис. 1 представлены результаты измерений атмосферного давления, приведенные к среднему уровню моря, максимальные значения скорости порывов ветра на высоте 10–12 м над земной поверхностью (параметр $ff3$), значения ТЕС и f_oF2 на станции в Калининграде, а также индексы геомагнитной активности K_p , D_{st} и A_E в период 5–12 декабря 2010 г. Тонкими линиями показаны средние значения ТЕС и f_oF2 за 13 дней до и после соответствующего момента времени.

Как видно из рис. 1, период 5–8 декабря 2010 г. характеризуется умеренной геомагнитной активностью. Во второй половине дня 08.12.2010 г. зарегистрирована суббурия, когда индекс K_p достиг трех, а значение A_E индекса достигло 441 нТл. В эти дни на ст. Калининград наблюдаются повышенные ночные значения ТЕС, достигающие

40% относительно осредненных величин. В дневных значениях не наблюдается каких-либо значительных отклонений. В вариациях критической частоты F2-слоя наблюдается уменьшение f_oF2 в период 15:00–18:00 UT 5–6 декабря 2010 г. на 15–33% относительно средних значений.

С 9 по 11 декабря 2010 г. геомагнитная обстановка остается спокойной. Значение K_p -индекса близко к нулю, D_{st} -индекс варьируется в пределах от -15 до 3 нТл, не претерпевая резких изменений. Значения ТЕС и f_oF2 меньше как средних значений, так и измеренных в предыдущие дни. В день 09.12.2010 г. величины ТЕС и f_oF2 близки к своим средним значениям. Однако в 10:00–14:00 следующего дня, т.е. 10.12.2010 г. уменьшение ТЕС достигает 32%, а f_oF2 – 15%. Следующее уменьшение ТЕС вплоть до 22% отмечается в 10:00 12.12.2010 г. К сожалению, вертикальное зондирование ионосферы на ст. Калининград в этот день не проводилось по техническим причинам.

Понижения значений ТЕС и f_oF2 , зарегистрированные на ст. Калининград после 09.12.2010 г., приходятся на фазу восстановления ионосферы после геомагнитного возмущения 08.12.2010 г. и на периоды изменения атмосферного давления на фоне усиления скорости порывов ветра. В период 9–10 декабря 2010 г. в Калининградском регионе развились штормовые метеорологические условия с усилением скорости порывов ветра до 7 баллов по шкале Бофорта, которые стали следствием изменения метеорологической обстановки на северо-западе и северо-востоке Европы.

На рис. 2 представлены карты приземного давления по данным реанализа MERRA-2 по состоянию на 12:00 UT в период с 5 по 12 декабря 2010 г. Рассмотрено изменение давления в области, ограниченной широтами от 0° до 70° N и долготами от 20° W до 40° E . Как видно из рис. 2, атмосферное давление в области южнее 30° N не претерпевает особых изменений в течение всего рассматриваемого периода. При этом с 08.12.2010 г. с северной Атлантики на Западную Европу надвигается область повышенного давления в полосе широт 50 – 60° N , а на следующий день над Восточной Европой образуется область пониженного давления. К 12.12.2010 г. область повышенного давления наблюдается только над северо-западной частью региона (в Великобритании и Исландии), в то время как метеорологическая обстановка на северо-востоке возвращается к состоянию, близкому к дню 08.12.2010 г. Таким образом, Калининград оказался между областями повышенного и пониженного давления к западу и востоку, что и определило неустойчивые погодные условия в период 09–11.12.2010 г. Усиления скорости порывов ветра 10.12.2010 г. превышают 13 м/с, что соответ-

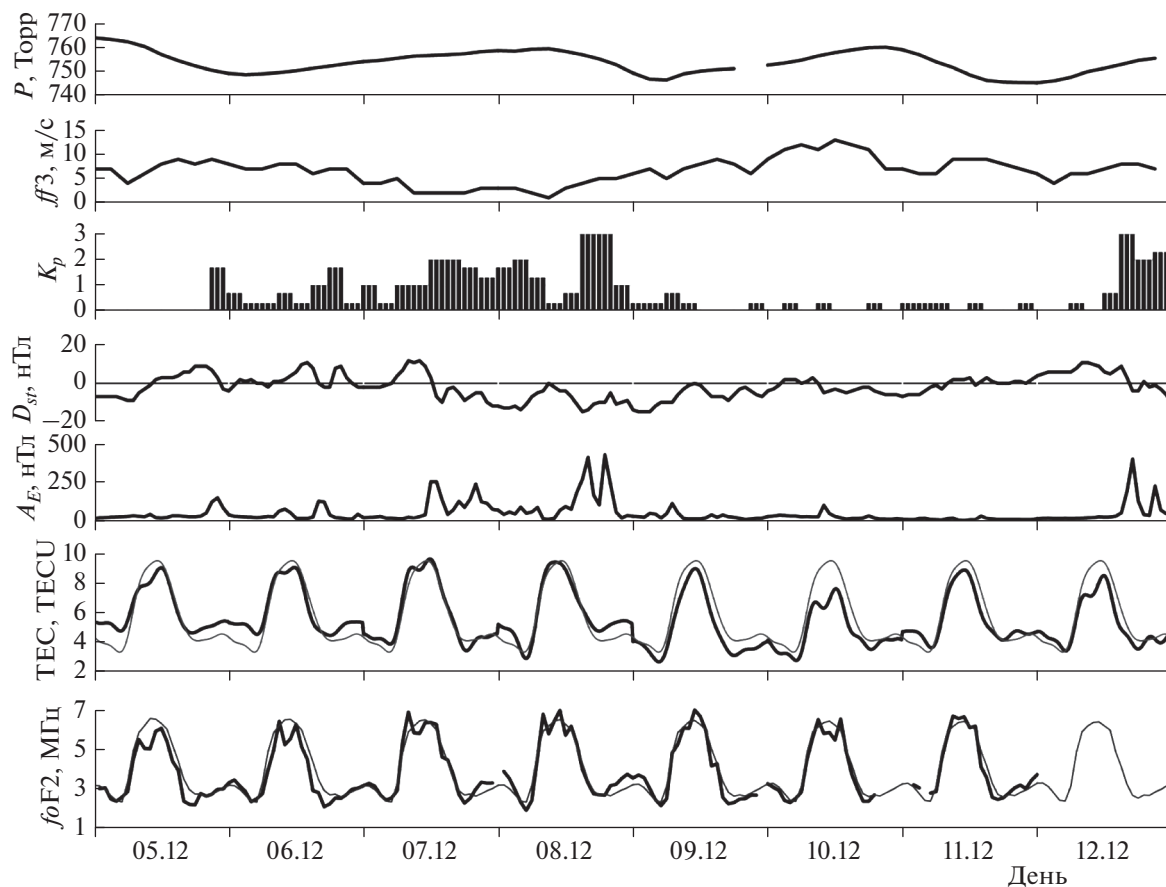


Рис. 1. Измерения атмосферного давления, максимальных порывов ветра, индексов геомагнитной активности K_p , D_{st} и A_E , TEC и f_oF2 в Калининграде с 5 по 12 декабря 2010 г.

ствует 7 баллам по шкале Бофорта. Именно в этот период отмечаются максимальные понижения TEC (см. рис. 1).

На рис. 3 представлены карты вариаций TEC для рассматриваемого региона в период 06:00–16:00 UT с 5 по 12 декабря 2010 г. Как видно из рис. 3, 08.12.2010 г. наблюдается изменение значений TEC по сравнению с предыдущими днями на широтах, значительно меньших широт области метеорологического возмущения, особенно заметное в области гребня экваториальной ионизационной аномалии и, видимо, связанное с усилением геомагнитной активности. На следующий день, т.е. 09.12.2010 г., во время фазы восстановления после геомагнитного возмущения наблюдается понижение значений TEC, а 10.12.2010 г. амплитудные значения TEC в этой области восстанавливаются до значений, соответствующих дням спокойной геомагнитной активности и отсутствию метеорологических возмущений. В этот же день на широтах $\approx 50^\circ$ N в Калининградском регионе проявляется область пониженных значений TEC, а в окрестности $\approx 20^\circ$ N, 0° E (северо-за-

пад Африки) образуется область повышенных значений TEC. Днем 11.12.2010 г. в приэкваториальной области отмечаются понижения значений TEC, сравнимые с возмущениями, вызванными геомагнитным возмущением 08.12.2010 г. В этот день единственным фактором, оказывающим влияние на состояние приэкваториальной области ионосферы, могли быть процессы в верхней атмосфере, инициированные развитием метеорологического возмущения на средних широтах. К 12.12.2010 г., пространственное распределение TEC возвращается к своему исходному состоянию в период 5–7 декабря 2010 г.

ОБСУЖДЕНИЕ

Пространственно-временные вариации атмосферных и ионосферных параметров, представленные на рис. 2 и 3, демонстрируют, что развитие метеорологического шторма сопровождается образованием 10.12.2010 г. ограниченной области с пониженными дневными значениями TEC между регионами повышенного и пониженного при-

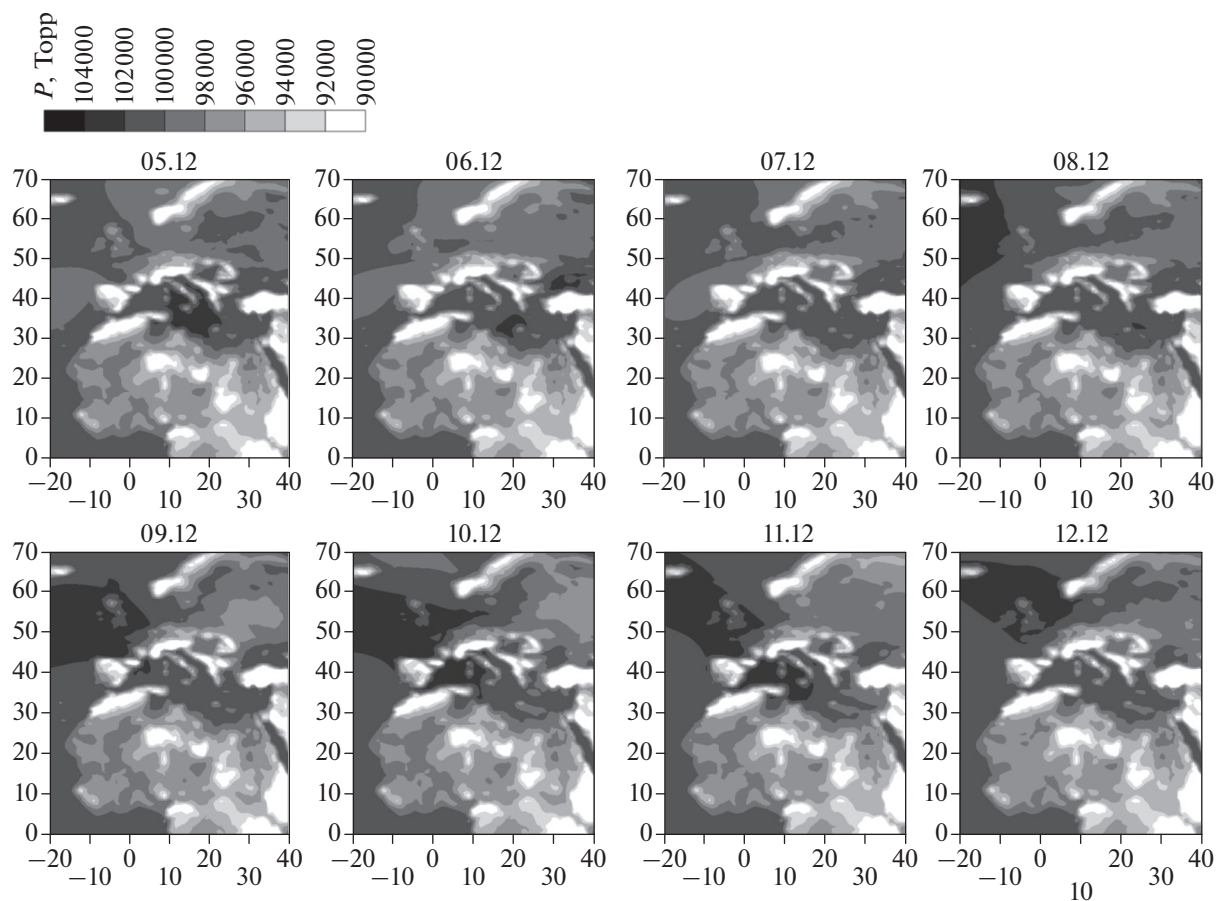


Рис. 2. Карты приземного давления по данным MERRA-2 в 12:00 UT с 5 по 12 декабря 2010 г.

земного атмосферного давления к западу и востоку от эпицентра метеорологического возмущения, а также зоны повышенных значений в приэкваториальной области. Уменьшения $foF2$ и ТЕС по данным измерений на ст. Калининград, находящейся в эпицентре события, составили 15% и 33% относительно средних значений, что несколько меньше, чем в аналогичных исследованиях в данном регионе [10–13].

Для более детальной оценки динамики верхней атмосферы во время развития метеорологического события были проанализированы вариации ТЕС на пунктах HERT (Хейлшем, Великобритания, 51° N , 0° E), WROC (Вроцлав, Польша, 51° N , 17° E) и МОБК (Обнинск, Россия, 55° N , 37° E), расположенных на одной широте с Калининградом, а также данные приэкваториальной станции SFER (Масполамас, Канарские острова, 28° N , 17° W). Суточные вариации ТЕС на этих станциях представлены на рис. 4. Из этого рисунка видно, что 08.12.2010 г. на всех среднеширотных станциях наблюдаются эффекты умеренно возмущенной геомагнитной обстановки в виде повышения ТЕС относительно средних значений и постепенное

возвращение к норме к 12.12.2010 г. В отличие от калининградской станции каких-либо существенных изменений в поведении ТЕС не наблюдается. Таким образом, отклик ионосферы на усиление амплитуды скорости порывов ветра в Калининграде в виде уменьшений ТЕС и $foF2$ имеет локальный характер и пространственный масштаб не превышает 500 км.

На приэкваториальной станции SFER вариации ТЕС имеют свои особенности. В период 5–7 декабря 2010 г. отчетливо видна реакция на изменение геомагнитной активности (изменение D_{st} -индекса в рассматриваемый период) и отклонения ТЕС от средних значений. Отклик на геомагнитное возмущение 08.12.2010 г. практически не выражен по сравнению со средними широтами. Однако 10.12.2010 г. во второй половине дня наблюдается резкое увеличение ТЕС, не связанное с геомагнитной активностью, которое на следующий день сменяется резким снижением амплитудных значений суточных вариаций ТЕС. Наблюдения на станции в эти дни отражают картину изменений пространственно-временного распределения ТЕС, представленную на рис. 3, и подтверждают обра-

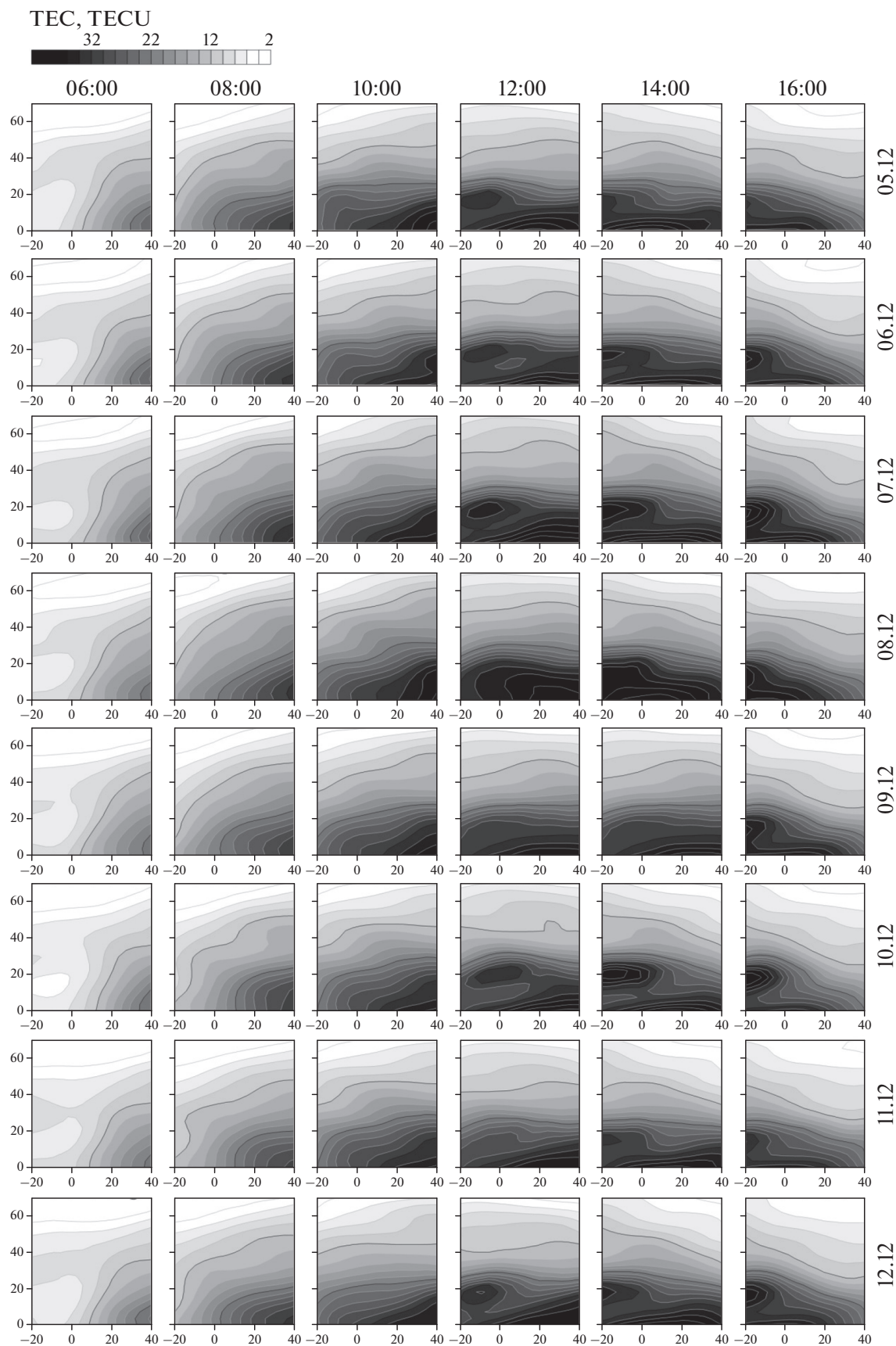


Рис. 3. Карты TEC по данным IGS в период 06:00–16:00 UT с 5 по 12 декабря 2010 г.

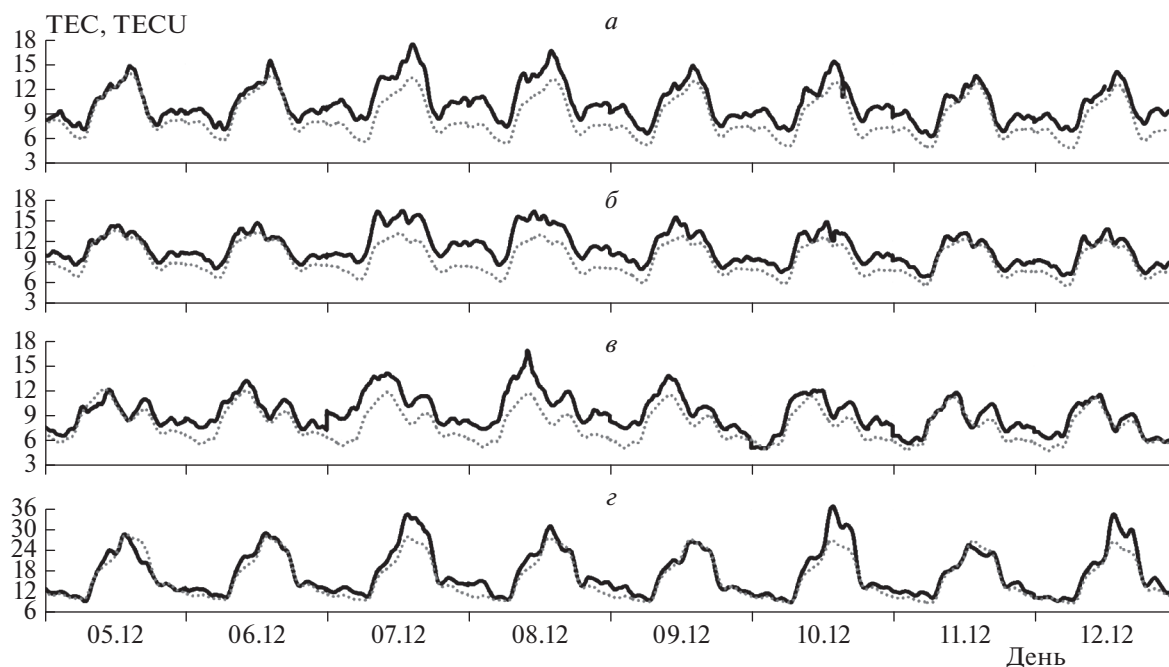


Рис. 4. Вариации TEC на станциях HERT (а), WROC (б), МОБК (в) и SFER (г) с 5 по 12 декабря 2010 г.

зование положительной аномалии и связь ионосферных возмущений с метеорологическими процессами на средних широтах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные в представленной работе наблюдения динамики параметров атмосферы и ионосферы над европейским регионом показали, что метеорологические возмущения в нижней атмосфере, сопровождающиеся повышением амплитуды скорости порывов ветра, влияют на состояние ионосферы. Ионосферные возмущения проявляются в понижении амплитудных значений ионосферного параметра TEC на 30% и электронной концентрации в максимуме F2-слоя на 15% в области над эпицентром метеорологического возмущения, а также в повышении значений TEC в приэкваториальной области. На следующий день область уменьшенных значений TEC оказывается смещенной к югу, что отражает динамику развития метеорологического возмущения.

Пространственные масштабы области ионосферных возмущений превышают масштабы области метеорологических возмущений. Изменения состояния приэкваториальной ионосферы в отсутствие геомагнитных возмущений могут быть инициированы электродинамическими процессами, развивающимися в условиях метеорологических возмущений среднеширотной атмосферы. Наличие таких связей указывает на сложный ха-

рактер физических процессов, влияющих на формирование ионосферных возмущений.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантами Российского фонда фундаментальных исследований № 18-05-00184 а (И.В. Карпов) и № 17-05-00574 а (О.П. Борчевкина).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Forbes J.M., Palo S.E., Zhang X. // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2000. V. 62. № 8. P. 685; [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(00\)00029-8](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(00)00029-8)
2. Rishbeth H., Mendillo M. // Ibid. 2001. V. 63. № 15. P. 1661; [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(01\)00036-0](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(01)00036-0)
3. Martinis C.R., Manzano J.R. // Ann. Geoph. 1999. V. 42. № 1. P. 1; <https://doi.org/10.4401/ag-3708>
4. Исаев Н.В., Костин В.М., Беляев Г.Г., Овчаренко О.Я., Трушкина Е.П. // Геомагнетизм и аэрономия. 2010. Т. 50. № 2. С. 253.
5. Polyakova A.S., Perevalova N.P. // Adv. Space Res. 2013. V. 52. P. 1416; <https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.07.029>
6. Chernigovskaya M.A., Shpynev B.G., Ratovsky K.G. // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2015. V. 136. P. 235; <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2015.07.006>
7. Chou M.Y., Lin C.C.H., Yue J. et al. // Geoph. Res. Lett. 2017. V. 44. № 3. P. 1219; <https://doi.org/10.1002/2016GL072205>
8. Li W., Yue J., Wu S. et al. // GPS Sol. 2018. V. 22. № 61; <https://doi.org/10.1007/s10291-018-0722-1>

9. Денуев В.Х., Денуева А.Х. // Геомагнетизм и аэронаука. 2010. Т. 50. № 6. С. 833.
10. Борчевкина О.П., Карпов И.В., Ильминская А.В. // Метеор. вестн. 2016. Т. 8. № 3. С. 30.
11. Борчевкина О.П., Карпов И.В. // Геомагн. аэронаука. 2017. Т. 57. № 5. С. 670;
<https://doi.org/10.7868/S0016794017040046>
12. Карпов И.В., Борчевкина О.П., Дадашев Р.З., Ильминская А.В. // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2. № 2. С. 64;
<https://doi.org/10.12737/18653>
13. Карпов И.В., Киевецкий С.П., Борчевкина О.П. и др. // Хим. физика. 2016. Т. 35. № 1. С. 59;
<https://doi.org/10.7868/S0207401X16010064>
14. Medvedev A.S., Gavrilov N.M. // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 1995. V. 57. P. 1221;
[https://doi.org/10.1016/0021-9169\(95\)00008-P](https://doi.org/10.1016/0021-9169(95)00008-P)
15. Fritts D.C., Alexander M.J. // Rev. Geoph. 2003. V. 41. № 1;
<https://doi.org/10.1029/2001RG000106>
16. Yigit E., Medvedev A.S. // Adv. Space Res. 2015. V. 55. P. 983;
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.11.020>
17. Plougonven R., Zhang F. // Rev. Geoph. 2014. V. 52. № 1. P. 33;
<https://doi.org/10.1002/2012RG000419>
18. Карпов И.В., Бессараб Ф.С., Кореньков Ю.Н. и др. // Хим. физика. 2016. Т. 35. № 1. С. 49;
<https://doi.org/10.7868/S0207401X16010052>
19. Карпов И.В., Киевецкий С.П. // Геомагнетизм и аэронаука. 2014. Т. 54. № 4. С. 553;
<https://doi.org/10.7868/S001679401404018X>
20. Karpov I., Kshevetskii S. // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2017. V. 164. P. 89;
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.07.019>
21. Васильев П.А., Карпов И.В., Киевецкий С.П. // Хим. физика. 2017. Т. 36. № 12. С. 56;
<https://doi.org/10.7868/S0207401X17120135>
22. Gelaro R., McCarty W., Suarez M. et al. // J. Climate. 2017. V. 30. P. 5419;
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0758.1>
23. Hernandez-Pajares M., Juan J.M., Sanz J. et al. // J. Geodesy. 2009. V. 83. № 3–4. P. 263;
<https://doi.org/10.1007/s00190-008-0266-1>