

УДК 550.388.2

ЛОКАЛЬНЫЕ И РЕГИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ ИОНОСФЕРЫ В ПЕРИОДЫ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ

© 2019 г. И. В. Карпов^{1, 2, *}, О. П. Борчевкина^{1, 2, **}, М. И. Карпов^{1, 2, ***}

¹Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН (ЗО ИЗМИРАН), г. Калининград, Россия

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

*e-mail: ivkarpov@inbox.ru

**e-mail: olgaborchevkina@gmail.com

***e-mail: mikhailekarpov@hotmail.com

Поступила в редакцию 02.10.2018 г.

После доработки 22.11.2018 г.

Принята к публикации 24.01.2019 г.

Выполнен анализ наблюдений параметров атмосферы и ионосферы в период метеорологических возмущений в ноябре–декабре 2010 г. Показано, что резкое изменение атмосферных параметров, в частности, повышение скорости порывов ветра на высоте 10 м устойчиво коррелирует с локальными понижениями критической частоты F_2 -слоя ионосферы и полного электронного содержания, возникающими над областью метеорологического возмущения через ~3 ч. Пространственные размеры области ионосферных возмущений определяются масштабами метеорологического возмущения и могут достигать ~1000 км. Предполагается, что в условиях метеорологических штормов усиливаются процессы возбуждения акустико-гравитационных волн в нижней атмосфере. Их распространение в верхнюю атмосферу приводит к возмущению состояния термосферы на пространственно-временных масштабах, определяемых длительностью и пространственными размерами области метеорологического возмущения. Такие крупномасштабные возмущения термосферы влияют на циркуляцию и электродинамические процессы в термосфере и ионосфере.

DOI: 10.1134/S0016794019040102

1. ВВЕДЕНИЕ

Результаты экспериментальных исследований показывают, что активные динамические процессы в нижней атмосфере, такие как прохождение атмосферных фронтов, развитие метеорологических штормов, струйные течения и т.д., вызывают разнообразные ионосферные эффекты, которые проявляются в возникновении перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ), возмущений электрического поля, возникновении оптических эмиссий [Борчевкина и Карпов 2017; Martinis and Manzano, 1999; Sauli and Boska, 2001; Polyakova and Perevalova, 2013; Yiğit et al., 2016; Li et al., 2017]. Физические процессы, реализующие такие связи, до настоящего времени недостаточно изучены. Разнообразие ионосферных эффектов, с одной стороны, усложняет задачи физической интерпретации наблюдаемых явлений, а, с другой стороны, предполагает продолжение исследований, посвященных анализу динамики ионосферы в условиях возмущений.

В теоретических исследованиях связи процессов в нижней атмосфере и ионосфере большое

внимание уделяется изучению роли акустико-гравитационных волн (АГВ). Модельные исследования, например [Куницын и др., 2007; Gavrilov and Kshevetskii, 2015; Hickey et al., 2001, 2011], показывают, что возмущения в нижней и средней атмосфере могут служить источниками АГВ, а наблюдаемые изменения состояния верхней атмосферы и ионосферы инициированы распространением АГВ из области возмущения.

Метеорологические штормы можно рассматривать как наиболее частое проявление динамической активности в нижней атмосфере и важный источник генерации АГВ. Естественно полагать, что метеорологическое возмущение, проходящее над отдельными регионами, является частью более крупного метеорологического процесса, пространственно-временные масштабы которого будут определять характеристики возбуждаемых волн, и соответствующие особенности ионосферных возмущений.

Развитие современных технологий спутниковых и наземных наблюдений позволяет исследовать вариации параметров атмосферы и ионосфе-

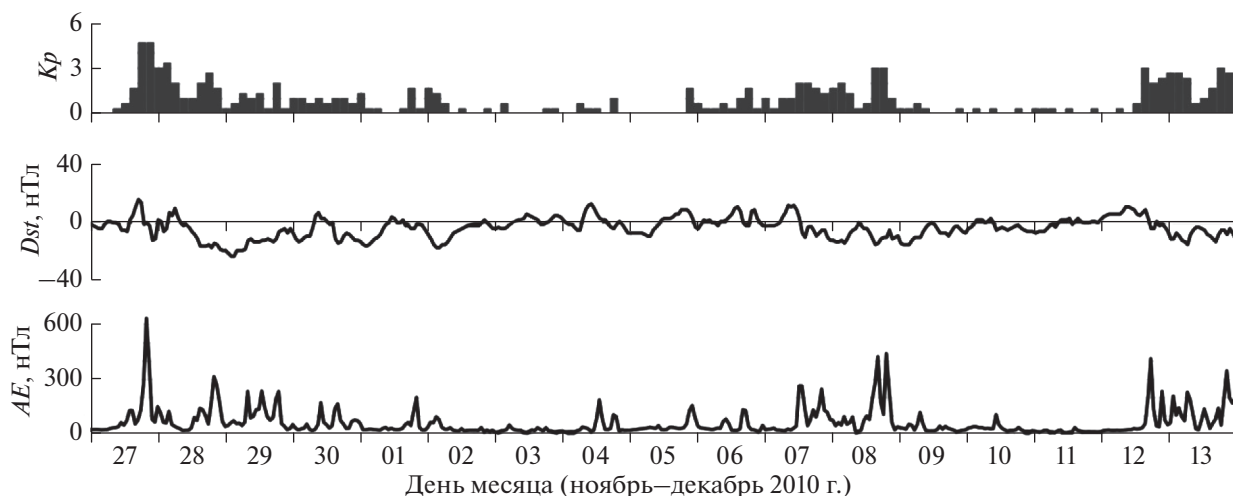


Рис. 1. Вариации Kp -индекса, Dst -индекса (нТл) и AE -индекса (нТл) 27 ноября—13 декабря 2010 г.

ры с повышенной точностью, пространственным и временным разрешением. Анализ таких наблюдений позволит оценить справедливость гипотезы о связи ионосферных неоднородностей, возникающих в периоды метеорологических штормов, с процессами распространения АГВ.

В настоящей работе представлены результаты анализа локальных и региональных наблюдений атмосферных и ионосферных параметров в период развития метеорологического возмущения в декабре 2010 г. в восточноевропейском регионе.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

В работе рассмотрены результаты наблюдений атмосферных и ионосферных параметров, выполненных на ст. Калининград (54°N , 20°E) в период 28 ноября—12 декабря 2010 г. Методика оценки изменения состояния атмосферы и ионосферы основывается на сравнении результатов наблюдений в течение продолжительного периода, включающего несколько дней, предшествующих метеорологическому шторму, непосредственно период шторма и несколько дней после него [Борчевкина и Карпов, 2017].

Геомагнитная обстановка с 27 ноября по 12 декабря 2010 г. представлена на рис. 1. Как видно, рассматриваемый период характеризуется спокойными условиями. Kp -индекс большую часть времени не превышал 2, Dst -индекс, описывающий буревую активность, варьировался в пределах от -20 до 20 нТл. Незначительные суббури наблюдались 27 ноября ($Kp > 4$, $AE > 600$ нТл), а также 8 и 12—13 декабря 2010 г. ($Kp = 3$, $AE \approx 400$ нТл). Отметим, что 10—11 декабря 2010 г., когда развитие метеорологического шторма в Калининграде достигло своего максимума, геомагнитная обстановка оставалась спокойной.

Для анализа атмосферных параметров метеорологического возмущения рассматривались вариации приземного атмосферного давления и скорости порывов ветра по наблюдениям на метеорологической ст. Калининград. Данные о локальном изменении атмосферных параметров взяты с сайта <http://www.rp5.ru/>.

На рисунке 2 показаны суточные вариации амплитуды порывов ветра (метеорологический параметр $ff3$, рис. 3а) и приземного атмосферного давления (рис. 3б) по наблюдениям в Калининграде в период с 28 ноября по 13 декабря 2010 г. Как видно из рис. 2, с конца ноября до 2 декабря 2010 г. наблюдался рост давления, с последующим понижением до 12 декабря 2010 г. Максимальные понижения атмосферного давления отмечались 9—12 декабря 2010 г. и достигали ~ 25 мм рт. ст. Штормовые условия над Калининградом отмечались 29—30 ноября, 2—3 декабря и 10—11 декабря 2010 г. Амплитуды скорости порывов ветра в эти периоды достигали 14 м/с, что соответствует оценке 7 баллов по шкале Бофорта.

На рисунке 3 показаны суточные вариации критической частоты ($foF2$, рис. 3а) и полного электронного содержания (ионосферный параметр ПЭС, рис. 3б) по наблюдениям в Калининградской обсерватории ИЗМИРАН. Как видно из рисунков, значительные изменения суточных вариаций критической частоты отмечались в дневное время 4—6 декабря 2010 г. и проявились в понижении $foF2$ на ~ 1 — 1.5 МГц. В периоды метеорологических возмущений можно отметить тенденцию к понижению критической частоты. В суточных вариациях ПЭС наблюдалось снижение дневных значений 1—5 декабря 2010 г., а также значительное понижение ПЭС в период штормовых метеорологических условий 10 декабря 2010 г., достигавшее ~ 30 — 40% по сравнению с ме-

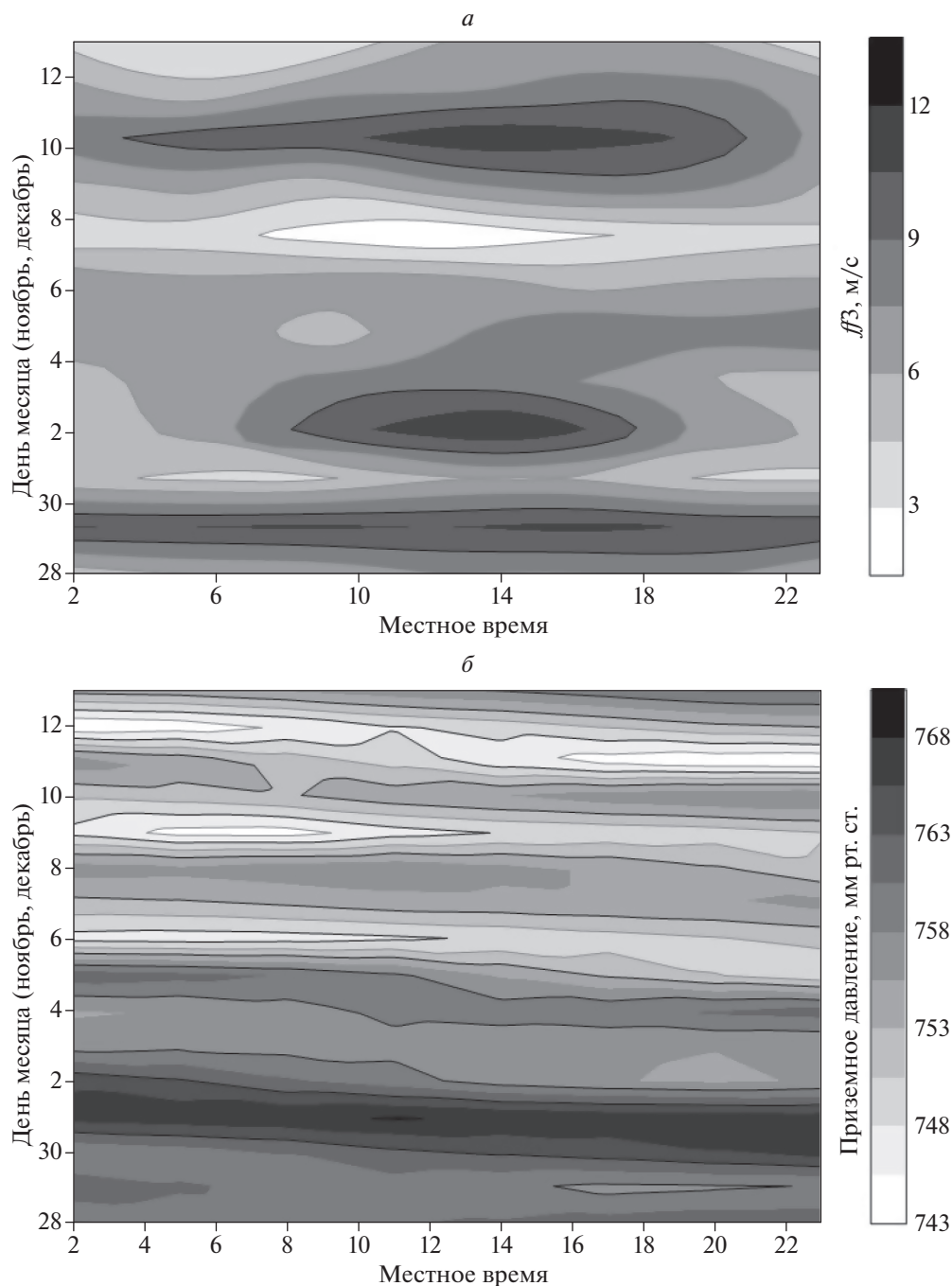


Рис. 2. Суточные вариации приземного давления (а) и амплитуды скорости порывов ветра (б) в Калининграде 28 ноября–13 декабря 2010 г.

теорологически спокойными днями 6–7 декабря 2010 г. Отметим также, что периоды понижений дневных значений ПЭС совпадают с периодами возрастания амплитуды порывов ветра (рис. 2). Реакция ионосферного параметра ПЭС на прохождение сильных метеорологических возмущений является характерной особенностью и неоднократно обсуждалась в литературе [Chernigovskaya et al., 2015; Chou et al., 2017].

Рассматриваемый метеорологический шторм, очевидно, являлся частью более крупного метеорологического процесса, развивавшегося в северо-западном секторе Европы. Для анализа региональной метеорологической ситуации в нижней атмосфере в исследуемый период использовались данные наблюдений, доступные в базе данных NCEP-NCAR [Kalnay et al., 1996]. Соответствующие региональные распределения приземного

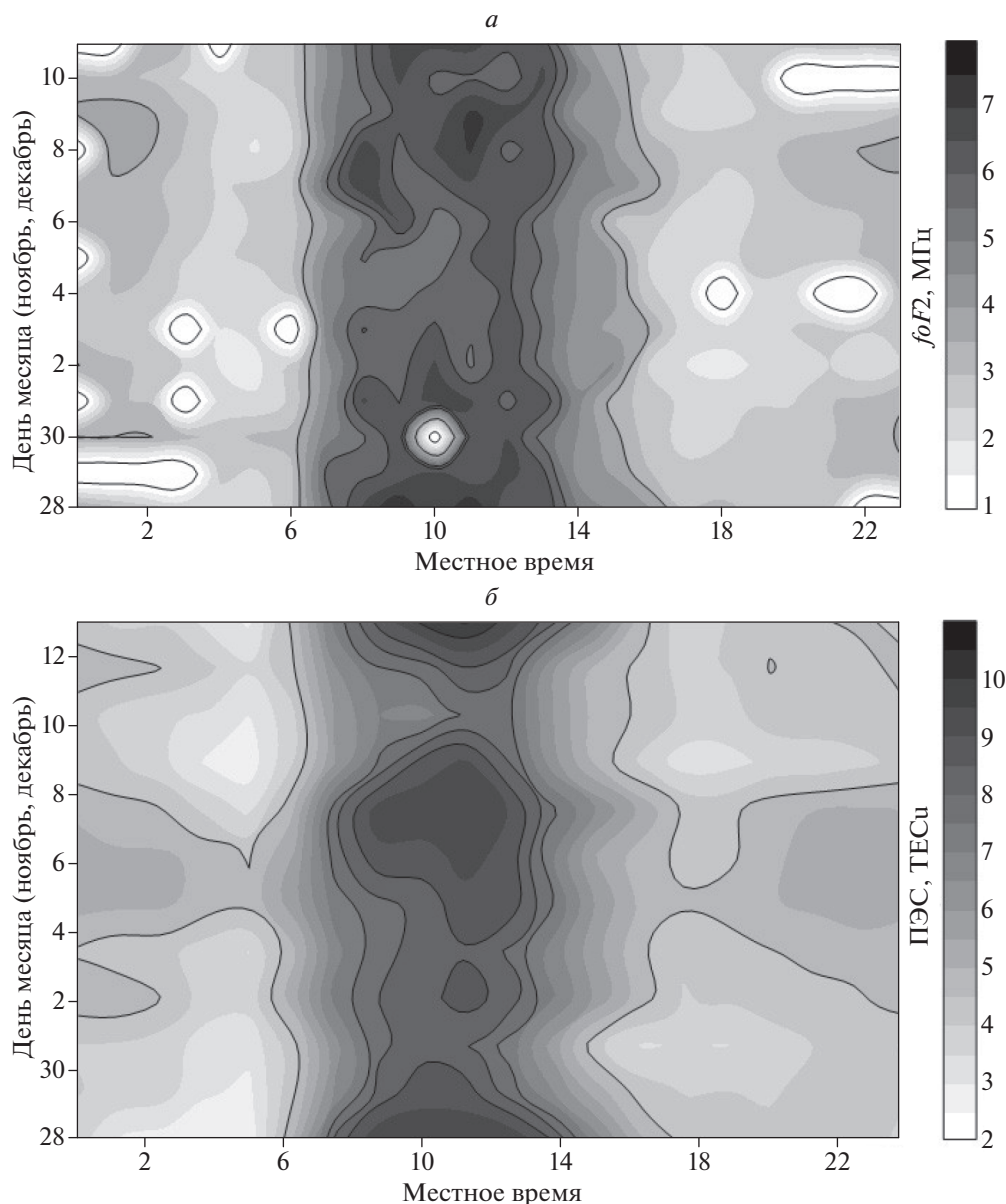


Рис. 3. Суточные вариации критической частоты (а) и полного электронного содержания (б) в Калининграде 28 ноября—13 декабря 2010 г.

давления для 12 UT 5—12 декабря 2010 г. представлены на рис. 4. Город Калининград (54°N , 20°E) отмечен звездочкой. Как видно из рис. 4, в рассматриваемый период времени Калининград оказался между двумя областями пониженного атмосферного давления к северу и югу, что, по-видимому, способствовало неустойчивым погодным условиям. Атмосферное давление в регионе изменялось день ото дня, незначительно повышаясь к 12.12.2010 г. Область повышенного давления смещалась с запада на восток, что привело к сокращению размеров зоны пониженного давления к северу и востоку от Калининграда. Согласно тем же архивным данным, ветровой режим в

регионе в период штормовых условий характеризовался преимущественно западными и северо-западными ветрами, амплитуда ветра увеличивалась с началом штормовых условий и достигала максимальных значений 10.12.2010 г. К западу от Калининграда штормовые условия наблюдались с 09.12.2010 г. и достигали 6—7 баллов по шкале Бофорта.

Для оценки пространственных размеров области ионосферных возмущений были использованы глобальные карты распределений ПЭС, построенные по данным навигационных спутниковых систем с пространственным разрешением 2.5 на 5 град по широте и долготе соответственно и

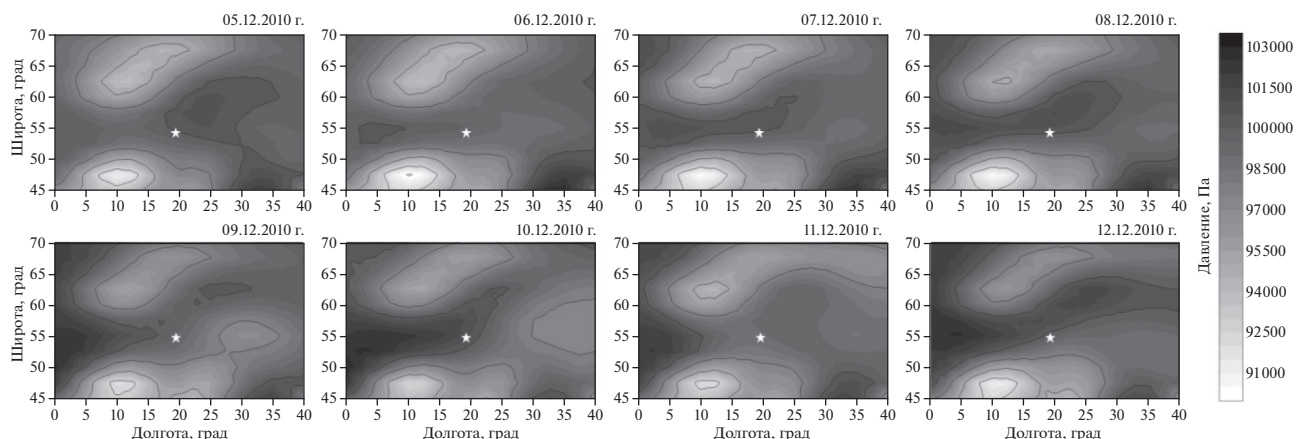


Рис. 4. Карты давления в северо-западном секторе Европы 9–12 декабря 2010 г. Звездочкой обозначено положение ст. Калининград.

временным разрешением 2 ч. Рассматриваемый регион с центром в Калининграде и ограниченный $\pm 15^\circ$ по широте и $\pm 20^\circ$ по долготе представлен для 9–12 декабря 2010 г. на рис. 5. Как видно, после 09.12.2010 г. отмечается снижение амплитудных значений ПЭС преимущественно в дневное время. Максимальные понижения дневных значений ПЭС наблюдались 10–11 декабря 2010 г. в дневное время (8–14 UT). В период метеорологического шторма область понижения дневных значений ПЭС смещалась к югу от Калининграда, достигая 40° N. К северу от Калининграда существенных изменений в суточных вариациях ПЭС не наблюдалось. В рассматриваемом долготном регионе (0° – 40° E) понижение дневных значений ПЭС происходило на всех долготах южнее $\sim 50^\circ$ N.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как следует из представленных выше результатов наблюдений, изменение состояния ионосферы в рассматриваемый период протекало на фоне спокойных геомагнитных условий, за исключением 08.12.2010 г., когда отмечено умеренное геомагнитное возмущение с $Kp = 3$ и $AE \approx 450$ нТл. При этом атмосферные условия в рассматриваемом регионе определялись существенной пространственной неоднородностью приземного атмосферного давления и скорости ветра, что способствовало развитию штормовых метеорологических возмущений. Ранее в работе [Депуев и Депуева, 2010] отмечалось, что резкие снижения атмосферного давления в нижней атмосфере при спокойных геомагнитных условиях оказывают влияние на состояние ионосферы, проявляющееся в снижении дневных значений критических частот. В работе [Борчевкина и Карпов, 2017] обращалось внимание, что возникающие в штормовых метеорологических условиях

ионосферные эффекты в $foF2$ и ПЭС устойчиво коррелируют с увеличением скорости порывов ветра в приземной атмосфере. В результатах наблюдений, представленных в настоящей работе, также можно отметить период быстрого понижения атмосферного давления после 02.12.2010 г. и понижения $foF2$ и ПЭС, продолжавшийся до 05.12.2010 г. Наиболее значительные возмущения в ионосфере над Калининградом в рассматриваемый период возникли в условиях метеорологического шторма 10.12.2010 г. На рисунке 6 показаны изменения амплитуды скорости порывов ветра и значений ионосферных параметров ПЭС и $foF2$ 10 и 11 декабря 2010 г. по отношению к значениям этих параметров в метеорологически спокойный день, предшествовавший возмущению (9 декабря 2010 г.). Как видно из рис. 6, значительное возрастание амплитуды скорости порывов ветра 10.12.2010 г. по отношению к 09.12.2010 г. отмечается в утренние часы. Следующие сутки 11.12.2010 г. незначительно отличаются по метеорологическим условиям от дня, предшествующего шторму. В изменениях ионосферных параметров отчетливо проявляется снижение значений ПЭС и $foF2$ днем 10 декабря до ~ 2.5 ТЕСи и ~ 1.5 МГц, соответственно. Можно также отметить задержку между временем появления максимальных возмущений ветра в нижней атмосфере и временем максимального понижения критических частот и ПЭС 10.12.2010 г., составляющую ~ 3 – 4 ч.

Как уже отмечалось, в условиях метеорологических возмущений наблюдается повышение волновой активности в диапазоне АГВ [Sauli and Boska, 2001; Sindelarova et al., 2009]. В теоретических исследованиях было показано, что распространение таких волн от поверхности Земли и их диссипация в верхней атмосфере приводит к формированию локализованных областей нагрева термосферы [Hickey, 2001, 2011; Карпов и др.,

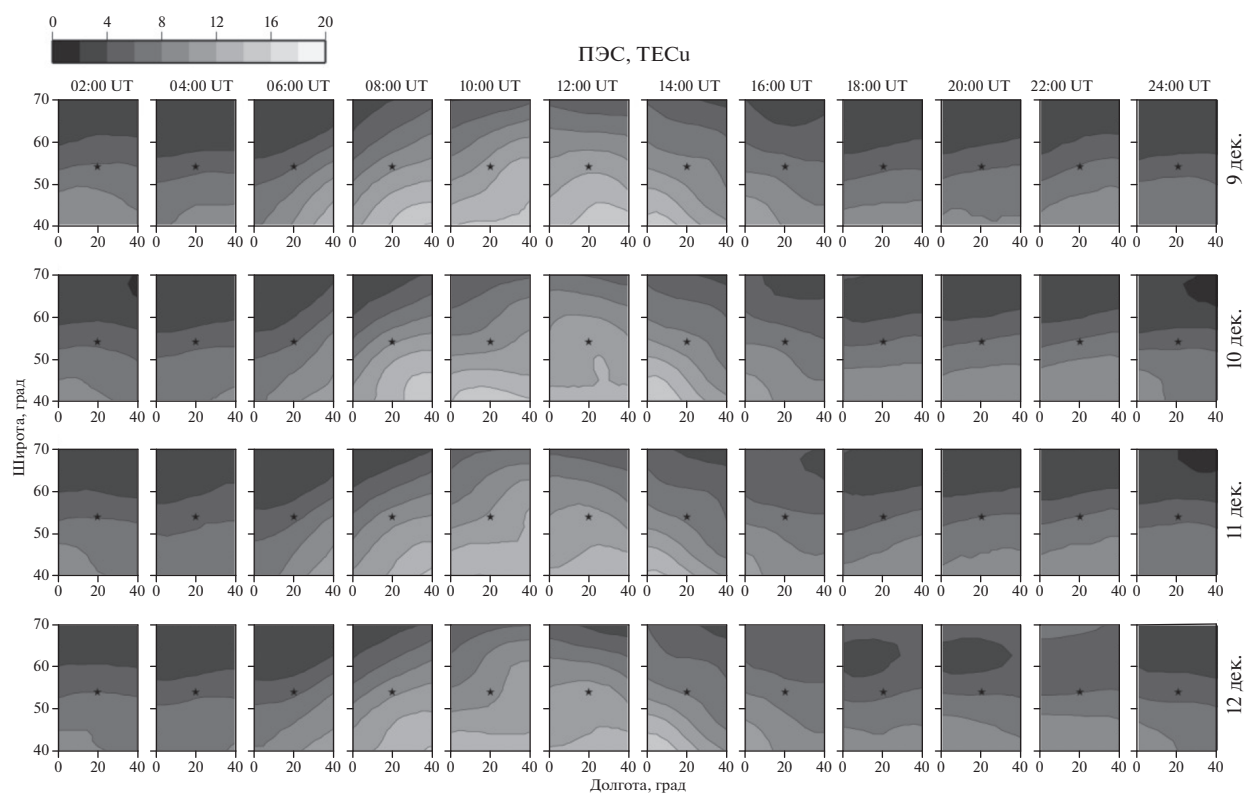


Рис. 5. Региональные карты распределений ПЭС в период 9–12 декабря 2010 г. Звездочкой отмечено положение ст. Калининград.

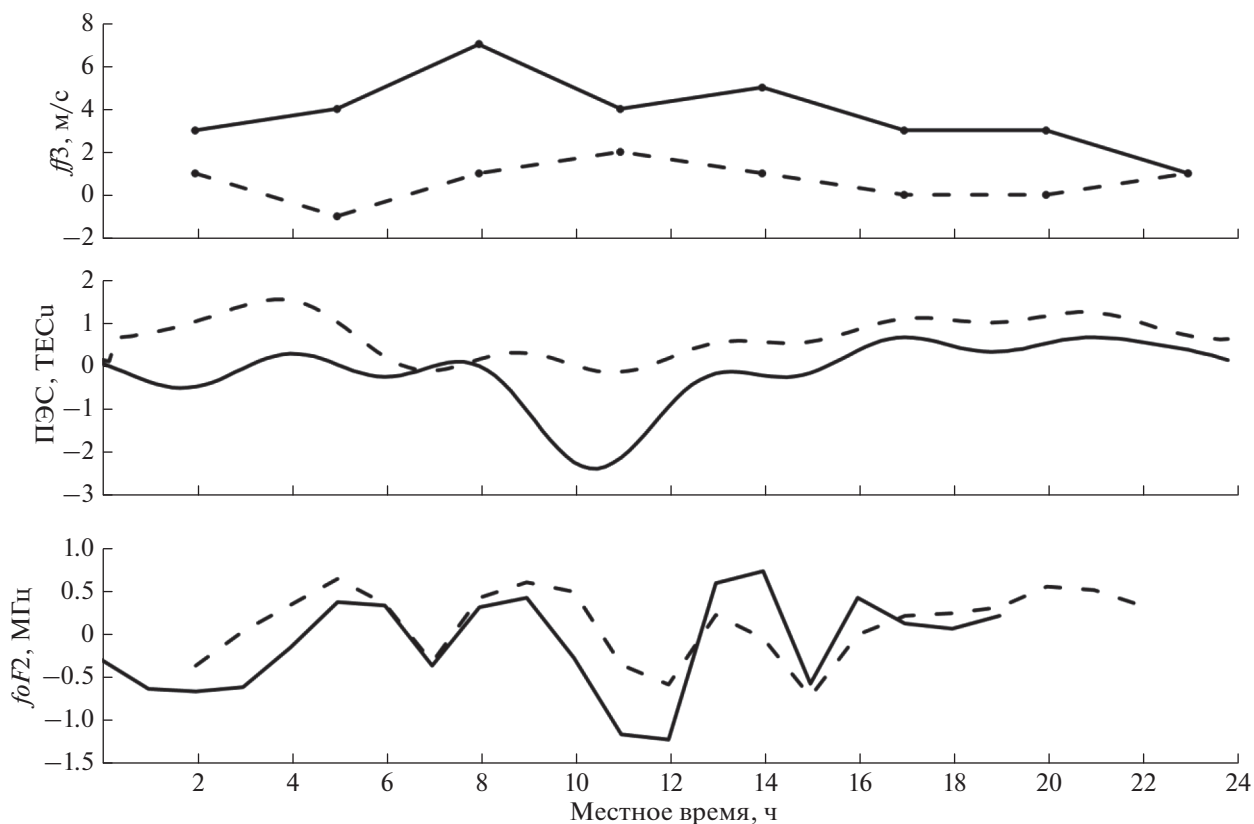


Рис. 6. Изменение амплитуды скорости порывов ветра, значений ПЭС и $foF2$ 10 декабря 2010 г. (сплошная линия) и 11 декабря 2010 г. (штриховая линия) по сравнению со значением этих параметров 9 декабря 2010 г.

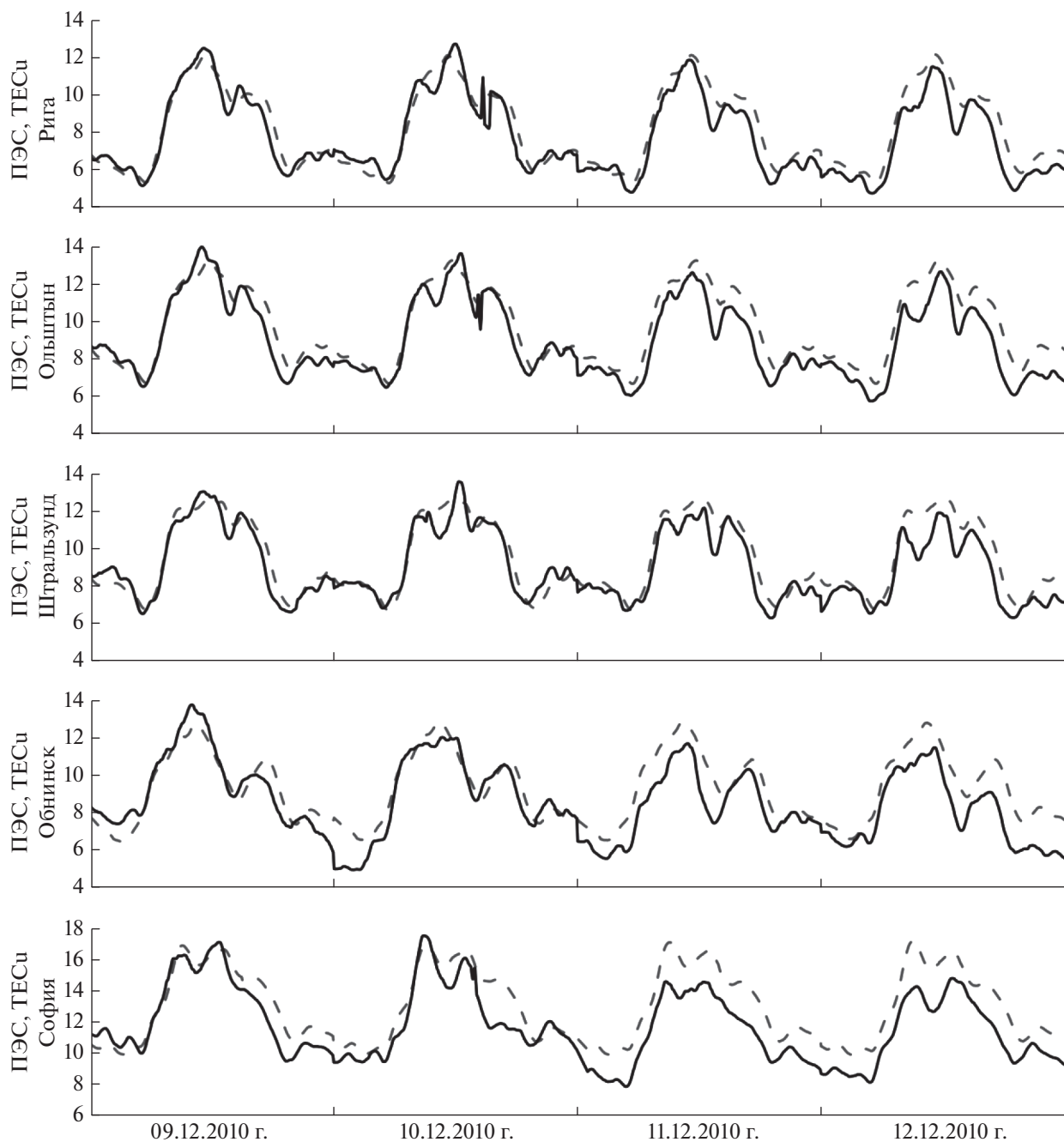


Рис. 7. Суточные вариации (сплошные линии) ПЭС и средние значения ПЭС за 15 предыдущих дней (пунктирные линии) на станциях в Риге, Олыштыне, Штральзунде, Обнинске и Софии 9–12 декабря 2010 г.

2016]. Появление областей повышенной температуры влияет на ионизационно-рекомбинационные процессы и приводит к снижению электронной концентрации. Можно предположить, что наблюдаемые изменения состояния ионосферы обусловлены такими процессами.

Естественно полагать, что изменчивость скорости ветра в нижней атмосфере характеризует неустойчивость динамики атмосферы и, следова-

тельно, усиление волновой активности. Возможно, что временная задержка в появлении ионосферных возмущений по отношению к резким повышениям амплитуд скорости ветра (метеорологический параметр $ff3$) определяется волновым характером процессов, реализующих связи нижней и верхней атмосферы.

Отметим также знакопеременный характер изменений суточного хода критической частоты,

который можно объяснить вертикальной структурой волн, распространяющихся из нижних слоев атмосферы. ПЭС, как интегральный по высоте параметр, в меньшей степени реагирует на вертикальную структуру волн. Однако, значительные дневные понижения f_oF_2 и ПЭС 10.12.2010 г. следует рассматривать именно как реакцию ионосферы на процессы в нижней атмосфере. Более подробный анализ различий в динамике ПЭС и f_oF_2 требует дополнительных исследований.

Региональные карты ПЭС на рис. 5 позволили выявить значительное уменьшение ПЭС в области метеорологического события и представить качественно пространственные масштабы возмущения. Однако из-за своего недостаточного пространственного и временного разрешения, а также погрешности измерений эти карты не могут использоваться в качестве единственного надежного инструмента выявления ионосферного отклика на метеорологические возмущения. Поэтому дополнительно были рассмотрены значения ПЭС, измеренные на отдельных наземных станциях, равноудаленных приблизительно на 5–15 град к северу, югу, востоку и западу от Калининграда, а также на соседней станции в Ольштыне. Данные измерения отличаются гораздо большей точностью по сравнению с глобальными картами ПЭС, а также доступны с разрешением до 5 с.

Соответствующие наблюдения ПЭС на станциях в Риге (56.94° N, 24.06° E), Ольштыне (53.89° N, 20.67° E), Штральзунде (54.51° N, 13.64° E), Обнинске (55.11° N, 36.60° E) и Софии (42.56° N, 23.39° E) для 9–12 декабря 2010 г. представлены на рис. 7 сплошной линией. Медиана, рассчитанная как скользящее среднее по 15 предшествующим дням, представлена пунктирной линией. Как видно из рисунка, на ст. Рига, расположенной северо-северо-восточнее Калининграда, изменения в суточных вариациях ПЭС 9–12 декабря 2010 г. весьма незначительны. На станциях, расположенных на одной широте с Калининградом и западнее (станции Ольштын и Штральзунд), наблюдалось слабое понижение ПЭС на 1–1.5 ТЕСу 11–12 декабря 2010 г. Восточнее Калининграда (ст. Обнинск) понижение значений ПЭС на 2–4 ТЕСу происходило после 10.12.2010 г. Наиболее заметные понижения значений ПЭС на 4 ТЕСу отмечаются южнее Калининграда (ст. София), начиная со второй половины дня 10.12.2010 г.

Таким образом, как следует из наблюдений (рисунки 5, 7) в период 9–12 декабря 2010 г. понижение значений ПЭС, как по отношению к медианному значению, так и по отношению к предшествовавшему метеорологическому шторму дню (09.12.2010 г.), отмечалось на всех станциях, расположенных на одной широте с Калининградом и южнее. Эти изменения состояния ионосфе-

ры проходили на фоне спокойных геомагнитных условий, и естественно полагать, что их причиной являются метеорологические процессы.

В модельных исследованиях [Karpov and Kshevetskii, 2017] показано, что распространение АГВ из нижней атмосферы ведет к формированию возмущений термосферы непосредственно над областью метеорологического шторма, время жизни которых зависит от длительности воздействия АГВ. Так, при длительности работы источника возбуждения АГВ ~2 ч пространственный масштаб возмущений термосферы может достигать ~1000 км, а время релаксации таких возмущений значительно превосходит время воздействия вследствие диссипации АГВ. Быстрые повышения амплитуды скорости ветра в нижней атмосфере оказывают существенное влияние на процессы возбуждения АГВ и появление локальных ионосферных возмущений. Эти процессы, по-видимому, вносят важный вклад в возмущение термосферы на начальном этапе развития метеорологического шторма. В дальнейшем, вследствие диссипации АГВ, в термосфере формируются крупномасштабные возмущения с размерами ~1000 км, которые влияют на циркуляцию термосферы и электродинамические процессы и приводят к существенным пространственным изменениям состояния ионосферы. Более точное описание процессов, влияющих на пространственные и временные особенности формирования ионосферных возмущений, инициируемых метеорологическими процессами, является целью дальнейших исследований.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ наблюдений атмосферных и ионосферных параметров в период развития метеорологического шторма показал следующее.

1. Развитие метеорологического шторма, сопровождающееся быстрыми изменениями скорости ветра, ведет к локальным ионосферным возмущениям, проявляющимся в понижении дневных значений ионосферного параметра ПЭС непосредственно над областью метеорологических возмущений. Изменение скорости ветра определяется неустойчивым состоянием атмосферы и характеризует процессы возбуждения атмосферных волн.

2. Пространственные размеры области проявления штормовых метеорологических условий определяются развитием конкретного метеорологического процесса. Пространственные масштабы ионосферных возмущений, наблюдавшихся в периоды возмущенных метеорологических условий 10–12 декабря 2010 г., достигали значительных размеров и составляли ~1000 км.

Физические процессы, определяющие пространственные и временные особенности ионосферных возмущений, возникающих в периоды метеорологических штормов, недостаточно изучены. Однако можно предположить, что 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. Более подробное описание комплекса физических процессов, реализующих связи динамики нижней и верхней атмосферы, предполагает проведение дополнительных модельных исследований.

5. БЛАГОДАРНОСТИ

В работе использовались данные NOAA Earth System Research Laboratory (www.esrl.noaa.gov/psd); NASA Crustal Dynamics Data Information System (www.cddis.nasa.gov); World Data Center for Geomagnetism, Kyoto (www.wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp).

6. ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований РФФИ № 18-05-00184.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Борчевкина О.П., Карпов И.В. Ионосферные неоднородности в периоды метеорологических возмущений // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 57. № 5. С. 670–675. 2017.
- Денуев В.Х., Денуева А.Х. Реакция критической частоты слоя F2 на резкое понижение атмосферного давления // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 50. № 6. С. 833–842. 2010.
- Карпов И.В., Кшевцевский С.П., Борчевкина О.П., Радицкий А.В., Карпов А.И. Возмущения верхней атмосферы и ионосферы, инициированные источниками акустико-гравитационных волн в нижней атмосфере // Хим. физика. Т. 35. № 1. С. 59–64. 2016.
- Куницын В.Е., Сураев С.Н., Ахмедов Р.Р. Моделирование распространения акустико-гравитационных волн в атмосфере для различных поверхностных источников // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физика. Астрономия. № 2. С. 59–63. 2007.
- Chernigovskaya M.A., Shpynev B.G., Ratovsky K.G. Meteorological effects of ionospheric disturbances from vertical radio sounding data // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 136. P. 235–243. 2015.
- Chou M.Y., Lin C.C.H., Yue J., Tsai H.F., Sun Y.Y., Liu J.Y., Chen C.H. Concentric traveling ionosphere disturbances triggered by Super Typhoon Meranti (2016) // Geophys. Res. Lett. V. 44. № 3. P. 1219–1226. 2017.
- Gavrilov N.M., Kshevetskii S.P. Dynamical and thermal effects of nonsteady nonlinear acoustic-gravity waves propagating from tropospheric sources to the upper atmosphere // Adv. Space Res. (Includes Cospas Information Bulletin). V. 56. № 9. P. 1833–1843. 2015.
- Hickey M.P., Schubert G., Walterscheid R.L. Acoustic wave heating of the thermosphere // J. Geophys. Res. V. 106. P. 21,543–21,548. 2001.
- Hickey M.P., Walterscheid R.L., Schubert G. Gravity wave heating and cooling of the thermosphere: Roles of the sensible heat flux and viscous flux of kinetic energy // J. Geophys. Res. V. 116. № A12326. 2011.
- Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R. et al. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project // Bull. Am. Meteorol. Soc. V. 77. № 3. P. 437–471. 1996.
- Karpov I.V., Kshevetskii S.P. Numerical study of heating the upper atmosphere by acoustic-gravity waves from local source on the Earth's surface and influence of this heating on the wave propagation conditions // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 164. P. 89–96. 2017.
- Li W., Yue J., Yang Y., Li Z., Guo J., Pan Y., Zhang K. Analysis of ionospheric disturbances associated with powerful cyclones in East Asia and North America // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 161. P. 43–54. 2017.
- Martinis C.R., Manzano J.R. The influence of active meteorological systems on the ionosphere F region // Ann. Geofisica. V. 42. № 1. P. 1–7. 1999.
- Polyakova A.S., Perevalova N.P. Comparative analysis of TEC disturbances over tropical cyclone zones in the north-west pacific ocean // Adv. Space Res. V. 52. P. 1416–1426. 2013.
- Sauli P., Boska J. Observations of gravity waves of meteorological origin in the F-region ionosphere // Phys. Chem. Earth. V. 26. № 6. P. 425–428. 2001.
- Sindelarova T., Buresova D., Chum J., Hruska F. Doppler observations of infrasonic waves of meteorological origin at ionospheric heights // Adv. Space Res. V. 43. № 11. P. 1644–1651. 2009.
- Yiğit E., Knížová P.K., 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 // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 141. P. 1–12. 2016.