

УДК 551.510.535

ВОЗМУЩЕНИЯ ИОНОСФЕРЫ ВО ВРЕМЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ШТОРМОВ

© 2020 г. М. И. Карпов^{1,2}, И. В. 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 РАН (ЗО ИЗМИРАН), г. Калининград, Россия

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

*e-mail: ivkarпов@inbox.ru

Поступила в редакцию 26.12.2019 г.

После доработки 13.03.2020 г.

Принята к публикации 21.05.2020 г.

Проанализированы возмущения ионосферы во время метеорологических штормов с усилением ветра от 8 баллов и выше по шкале Бофорта в Калининградской области за период 2010–2018 гг. К рассмотрению принимались ионосферные наблюдения, выполненные в условиях низкой геомагнитной активности. Анализ показал, что все выделенные события сопровождались возмущениями полного электронного содержания (ТЕС) и/или электронной концентрации в максимуме F_2 -слоя ионосферы (foF_2) спустя несколько часов после достижения максимума в скорости приземного ветра. При этом в четырех случаях из шести возмущения вдвое превысили стандартное отклонение величин от средних медианных значений. В четырех случаях наблюдались отрицательные возмущения ТЕС и foF_2 (уменьшения величин), и в двух – положительные (увеличения ТЕС и foF_2). Возмущения наблюдались на протяжении не менее 3 ч преимущественно в дневное время суток. Относительные возмущения ТЕС, обусловленные метеорологическими штормами, превосходят соответствующие возмущения foF_2 .

DOI: 10.31857/S0016794020050107

1. ВВЕДЕНИЕ

Прохождение атмосферных фронтов, формирование циклонов и антициклонов, образование мезомасштабной турбулентности, струйных потоков и прочих метеорологических процессов в нижней атмосфере являются источниками генерации акустико-гравитационных волн (АГВ) [Medvedev and Gavrilov, 1995; Fritz and Alexander, 2003; Plougonven and Snyder, 2007; Plougonven and Zhang, 2014]. По мере распространения АГВ от приземного источника, их амплитуда нарастает вследствие уменьшения плотности с ростом высоты. Процессы диссипации в значительной мере определяют возможности вертикального распространения волн и высоту, до которой может распространяться атмосферная волна. Теоретические исследования показывают, что метеорологические источники возбуждают сравнительно короткопериодные АГВ [Snively and Pasko, 2003]. Инфразвуковые волны и АГВ с периодами, близкими к периоду Вейсяля–Брента, распространяясь из области возбуждения практически вертикально, могут достигать высот термосферы и ионосферы [Schubert et al., 2005]. Диссипация та-

ких волн приводит к формированию локальных областей нагрева термосферы, что влияет на динамику и ионизационно-рекомбинационные процессы ионосферы [Карпов и Кшевецкий, 2014; Karпов and Kshevetskii, 2017].

Экспериментальные исследования состояния и динамики ионосферы над областями развития экстремальных метеорологических событий, таких как ураганы и тайфуны, демонстрируют формирование различного рода эффектов, в том числе перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ), возмущений электрического поля, полного электронного содержания, возникновений оптических эмиссий, явлений F -рассеяния и пр. (Martinis and Manzano, 1999; Isaev et al., 2002; Исаев и др., 2010; Polyakova and Perevalova, 2013; Chernigovskaya et al., 2015; Chou et al., 2017; Li et al., 2017). Среднемасштабные ПИВ, инициированные тайфунами, со средней горизонтальной скоростью 120–130 м/с, амплитудой 1.8–2.0 TECU и максимальными горизонтальными масштабами ~600 км были представлены в работе [Song et al., 2016]. В работе [Li et al., 2018] при исследовании нескольких тайфунов у побережья Австралии об-

наружили увеличения и/или уменьшения электронной концентрации в дни, когда скорость ветра достигала максимального значения. При этом амплитуды изменений полного электронного содержания (TEC) и критической частоты $F2$ -слоя ионосферы ($foF2$) достигали 4–6 TECU и 1.5–2.0 МГц соответственно, т.е. 35–50% относительно невозмущенных значений.

Мониторинг менее масштабных и менее интенсивных событий также показывает их воздействие на верхнюю атмосферу, хотя эффекты в данных случаях выражены слабее. Так, резкие понижения атмосферного давления в Московском регионе сопровождались изменением электронной концентрации в максимуме $F2$ -слоя на 10–15% относительно медианных значений и были как отрицательными (днем), так и положительными (ночью). Анализ спектра вариаций показал присутствие колебаний с периодами от 0.5 до 10 дней [Депуев и Депуева, 2010]. Наблюдения во время усиления приземного ветра вплоть до штормовых условий в Калининградской области показали уменьшения TEC и $foF2$ на 30% и 15% соответственно, при этом сопровождались положительными эффектами в приэкваториальных областях, что демонстрирует сложный характер распространения возмущения от приземного источника [Борчевкина и Карпов, 2017; Карпов и др., 2019а, б].

Цель настоящей работы – выделить на основе многолетних наблюдений в Калининградском регионе ионосферные возмущения, обусловленные преимущественным влиянием метеорологической активности.

2. МЕТОДЫ И ДАННЫЕ

Состояние и изменчивость ионосферы определяется многими геофизическими факторами. Зачастую развитие метеорологических возмущений происходит на фоне значительных изменений геомагнитной и солнечной активностей, повышении сейсмической активности, что значительно затрудняет выделение ионосферных эффектов, инициируемых метеорологическими процессами.

В работе проанализированы локальные вариации ионосферы в районе ст. Калининград (54° N, 20° E) во время продолжительных метеорологических событий в регионе за 2010–2018 гг. Для описания метеорологической обстановки использовались трехчасовые измерения максимальных значений порывов ветра, а также атмосферного давления, приведенного к среднему уровню моря, по архивным данным, представленным на сайте (www.gr5.ru). В качестве данных для анализа отклика ионосферы использовались часовые измерения критической частоты $F2$ -слоя ионосферы, характеризующего максимум в вер-

тикальном профиле электронной концентрации, по данным ионозонда “Парус-А” Калининградского филиала ИЗМИРАН, а также осредненные за 10-минутный интервал измерения полного электронного содержания по данным наблюдений сигналов GPS. В качестве дополнительного источника данных использовались наблюдения, выполненные на расположенных вблизи Калининграда метеорологической станции в г. Ольштын (53° N, 20° E), Польша (часовые измерения) и станции International GNSS Service LAMA в н.п. Ламковко. Для сравнительного анализа ионосферных возмущений, вызываемых метеорологическими процессами в Калининградском регионе, были выбраны наблюдения TEC на ст. Херстмонсе Касл в Великобритании (50° N, 0° E).

Для анализа были выбраны метеорологические события, когда максимальная скорость приземного ветра в Калининграде достигала 17 м/с и более, что соответствует по шкале Бофорта 8 баллам и выше. Из общего числа событий были исключены дни с умеренной или высокой геомагнитной активностью. Критерием для спокойных условий являлось значение индекса геомагнитной активности $Kp \leq 3$ в день события или в предыдущие сутки, значение Dst -индекса $-20 \leq Dst \leq 20$ нТл, и при этом не менялось более чем на 20 нТл в течение суток. Источником изменений TEC и $foF2$ могло бы также стать усиление авроральной активности. Акустико-гравитационные волны (АГВ), генерируемые в высоких широтах вследствие интенсификации авроральной электроструи, способны достигнуть широты г. Калининграда через несколько часов и влиять на состояние ионосферы. Поэтому дополнительным критерием отбора событий, выбрано значение AU - и AL -индексов не более 150 нТл в пиковые дни метеорологической активности.

Для анализа возмущений $foF2$ и TEC были определены отклонения данных величин в i -й момент времени относительно скользящей медианы, отцентрированной на день рассматриваемого дня, с окном 13 сут до и после рассматриваемого момента времени:

$$\Delta x_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\bar{x}} \times 100\%,$$

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N},$$

где $i = -13 \dots +13$, $N = 27$.

Стандартное отклонение величин определено как

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}.$$

Таблица 1. Среднее атмосферное давление, максимальная скорость порывов ветра, отклонения ТЕС и $foF2$ в Калининграде и Ольштыне, отклонения ТЕС на ст. Херстмонсе Касл во время рассмотренных метеорологических событий 2010–2018 гг.

Дата	Калининград		Ольштын		ΔТЕС Калининград/ Ламковко		Δ $foF2$ Калининград		ΔТЕС Херстмонсе Касл	
	$ff3$, м/с	p , мм рт. ст.	$ff3$, м/с	p , мм рт. ст.	σ	%	σ	%	σ	%
27.03.2010	17	748	14	750	–	–	1.8	–18	–	–
26.12.2011	16	766	16	768	1.9	–28	–	–	–	–
27.12.2011	17	767	17	769	2.1	–34	–	–	1.7	–17
06.12.2013	17	734	20	738	1.6	–28	Нет данных		–	–
15.03.2014	19	746	22	747	2.0	–18	1.9	–13	1.9	–17
16.03.2014	16	746	14	747	1.6	–22	1.6	–18	1.6	–15
17.03.2014	20	748	25	750	1.8	–37	2.3	–28	–	–
29.10.2017	18	737	20	738	–	–	–	–	–	–
30.10.2017	18	751	20	754	2.0	–	–	–	–	–
23.10.2018	12	757	17	758	–	–	–1.6	–	1.8	16
24.10.2018	17	753	20	753	2.4	20	–	16	–	–

Анализ значимости расхождений наблюдений ТЕС в дни метеорологических штормов и медианных значений ТЕС по критерию Пирсона χ^2 показал,

что расчетные значения критерия значительно превосходят критический уровень, что указывает на неслучайность наблюдаемых возмущений ионосферы.

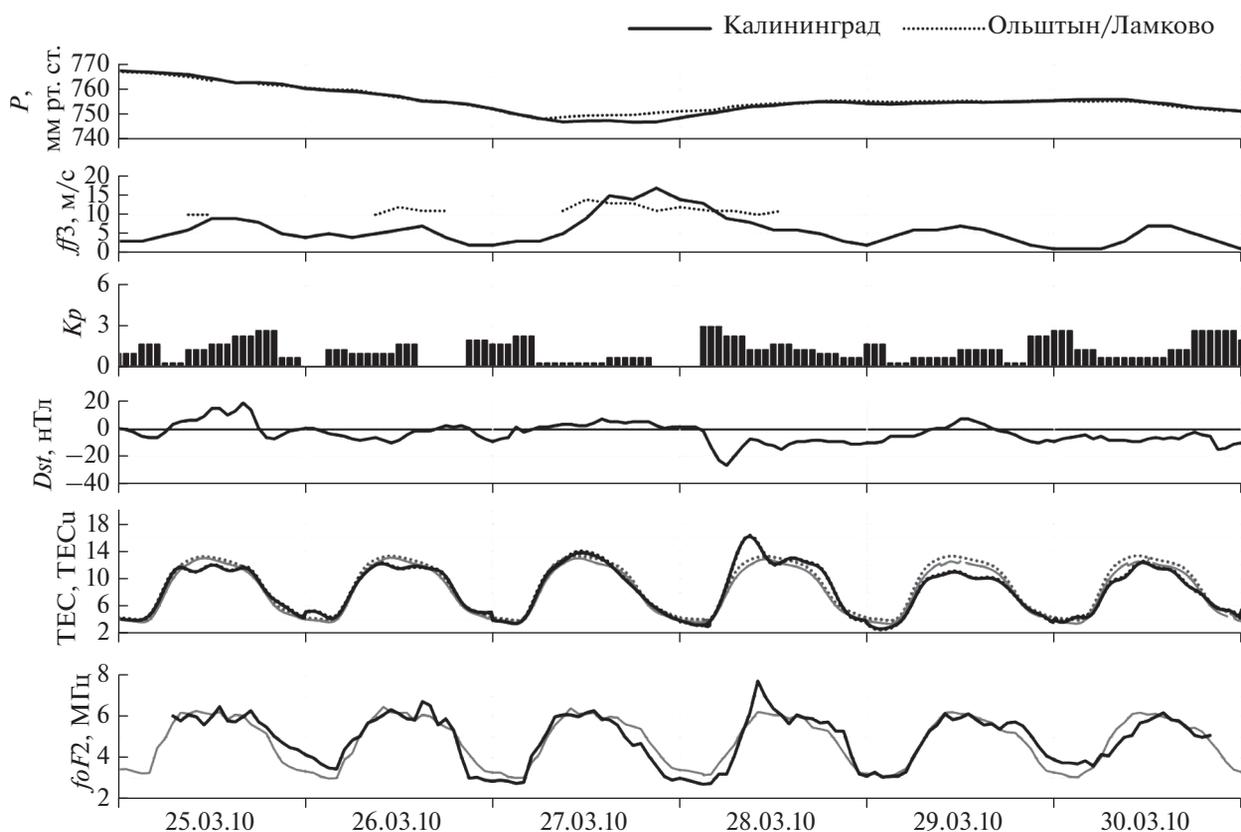


Рис. 1. Измерения атмосферного давления P , максимальных порывов ветра $ff3$, индексов геомагнитной активности Kp и Dst , а также ТЕС и $foF2$ в Калининграде и Ольштыне с 25 по 30 марта 2010 г. Серыми линиями указаны медианные значения ТЕС и $foF2$.

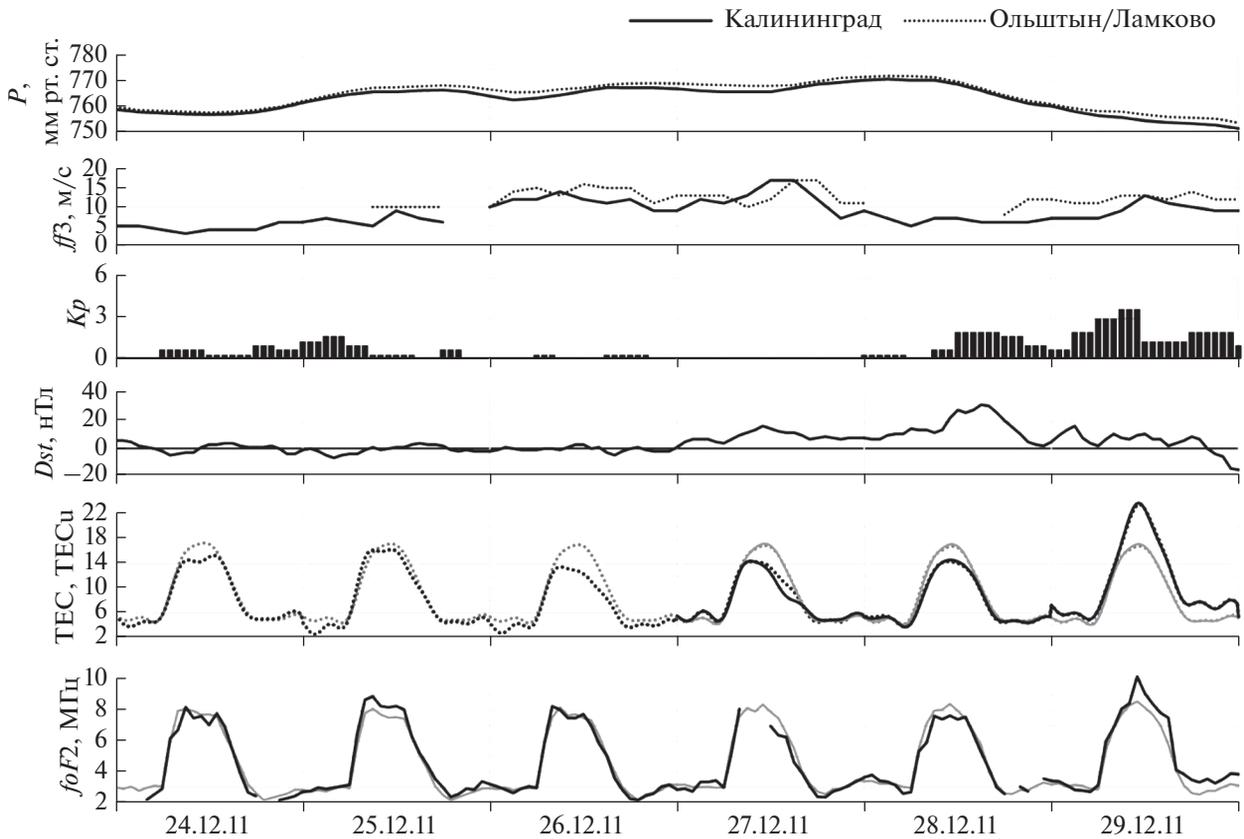


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, но с 24 по 29 декабря 2011 г.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Всего по указанным критериям для окончательного анализа было отобрано шесть событий продолжительностью от одного до трех дней. В таблице 1 приведены обобщенные данные по каждому событию, в том числе максимальные порывы ветра ($ff3$) и среднее атмосферное давление (p), приведенное к уровню моря, в Калининграде и Ольштыне, а также возмущения TEC и $foF2$, включая наблюдения ст. Херстмонсе Касл, выраженные в величинах стандартного отклонения и в процентах относительно медианных значений. Для возмущений менее 1.5σ в табл. 1 указан прочерк.

На рисунке 1 представлены данные наблюдений атмосферного давления, скорости максимальных порывов ветра, индексов геомагнитной активности Kp и Dst , а также данные TEC и $foF2$ в Калининграде и Ольштыне с 25 по 30 марта 2010 г. Серыми линиями указаны медианные значения TEC и $foF2$. Во второй половине дня 27.03.2010 г. наблюдался максимум метеорологической активности в регионе, когда скорость ветра достигла 17 м/с. В вариациях TEC не зарегистрировано существенных отклонений, однако уменьшение критической частоты $F2$ -слоя по

данным вертикального зондирования составило 18% относительно медианных значений (1.8 стандартного отклонения) и продолжалось вплоть до 06:00 UT 28.03.2010 г. После 08:00 UT наблюдается резкое увеличение TEC на 34% относительно медианных значений, а также $foF2$ на 24%, причинами которого могут быть как атмосферные условия, резкое падение Dst -индекса, так и усиление авроральной активности. По данным WDC for Geomagnetism, Kyoto (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>) всплеск AL -индекса в 05:00–07:00 UT и 12:00 UT 28 марта 2010 г. достигал 400 нТл, что могло вызвать усиление авроральной электроструи и генерации АГВ, которые могут достигнуть широты Калининграда через несколько часов. Однако возмущение в этот день происходит на фоне ослабления метеорологической активности и выходит за пределы периода рассмотрения в данной работе.

На рисунке 2 представлены результаты аналогичных наблюдений вариаций атмосферных и ионосферных параметров для периода с 24 по 29 декабря 2011 г. Как видно из рис. 2, 26–27 декабря, когда скорость ветра достигала 16–17 м/с, наблюдается падение TEC на 28 и 34% (1.9σ и 2.1σ соответственно), сохраняющееся и на следующий день. Уменьшения $foF2$ в данном случае вы-

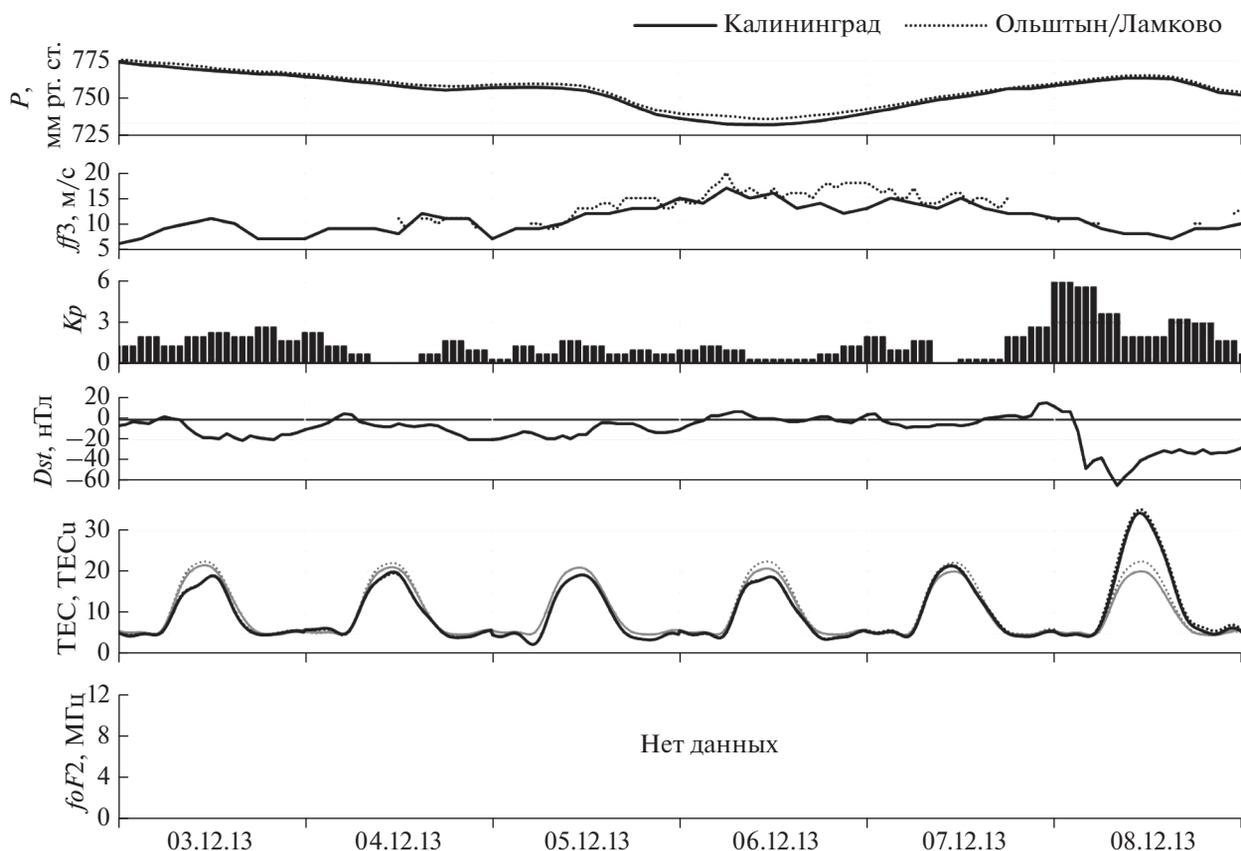


Рис. 3. То же, что и на рис. 1, но с 3 по 8 декабря 2013 г.

ражены слабее и не выходят за пределы стандартного отклонения. Около полудня 29 декабря хорошо видна реакция на усиление геомагнитной активности, проявившаяся в повышении электронной концентрации.

Анализ для события 3–8 декабря 2013 г. представлен на рис. 3. В данный период поведение ТЕС характеризуется спокойным ходом, и 6 декабря, когда порывы ветра достигали 20 м/с, наблюдается уменьшение полного электронного содержания на 28% относительно медианных значений, хотя данное возмущение составляет лишь 1.6 стандартного отклонения величины. В отличие от предыдущих событий, в данном случае эффекты наблюдаются на фоне пониженного атмосферного давления. Вертикальное зондирование ионосферы в данный период не проводилось по техническим причинам.

Следующее событие усиления метеорологической активности наблюдалось 15 и 17 марта 2014 г. Результаты соответствующих наблюдений представлены на рис. 4. Данный случай примечателен наиболее высокими амплитудами порывов скорости ветра, составившими 19–20 м/с в Калининграде и 22–25 м/с в Ольштыне. В околополуденные часы 15.03.2014 г., когда атмосферное давле-

ние опустилось ниже 740 мм рт. ст., а порывы ветра превысили 20 м/с, на протяжении порядка 7–8 ч наблюдается уменьшение ТЕС и $foF2$ на 18 и 13% (2.0 и 1.9 стандартного отклонения) соответственно. В следующие два дня неустойчивой метеорологической обстановки 16 и 17 марта отрицательные возмущения ТЕС и $foF2$ сохраняются и достигают –37 и –28% соответственно.

На рисунке 5 представлены наблюдения метеорологической и ионосферной обстановки 27 октября–1 ноября 2017 г. Максимальные порывы ветра достигали 20 м/с во второй половине 29 октября–первой половине 30 октября. На протяжении 3 ч в ночное время суток наблюдался существенный рост ТЕС, достигавший в максимуме 64% относительно медианных значений (2.0 стандартного отклонения). Увеличения $foF2$ при этом составили 32% или 1.5 стандартного отклонения.

Последнее событие за 2010–2018 гг. зарегистрировано 23–24 октября 2018 г. Соответствующие измерения представлены на рис. 6. К полудню 23 октября приземное атмосферное давление опустилось ниже 750 мм рт. ст., скорость ветра превысила 17 м/с и на следующий день достигла 20 м/с. В ночь на 24 октября наблюдался рост электронной концентрации, и к 09:00 UT увели-

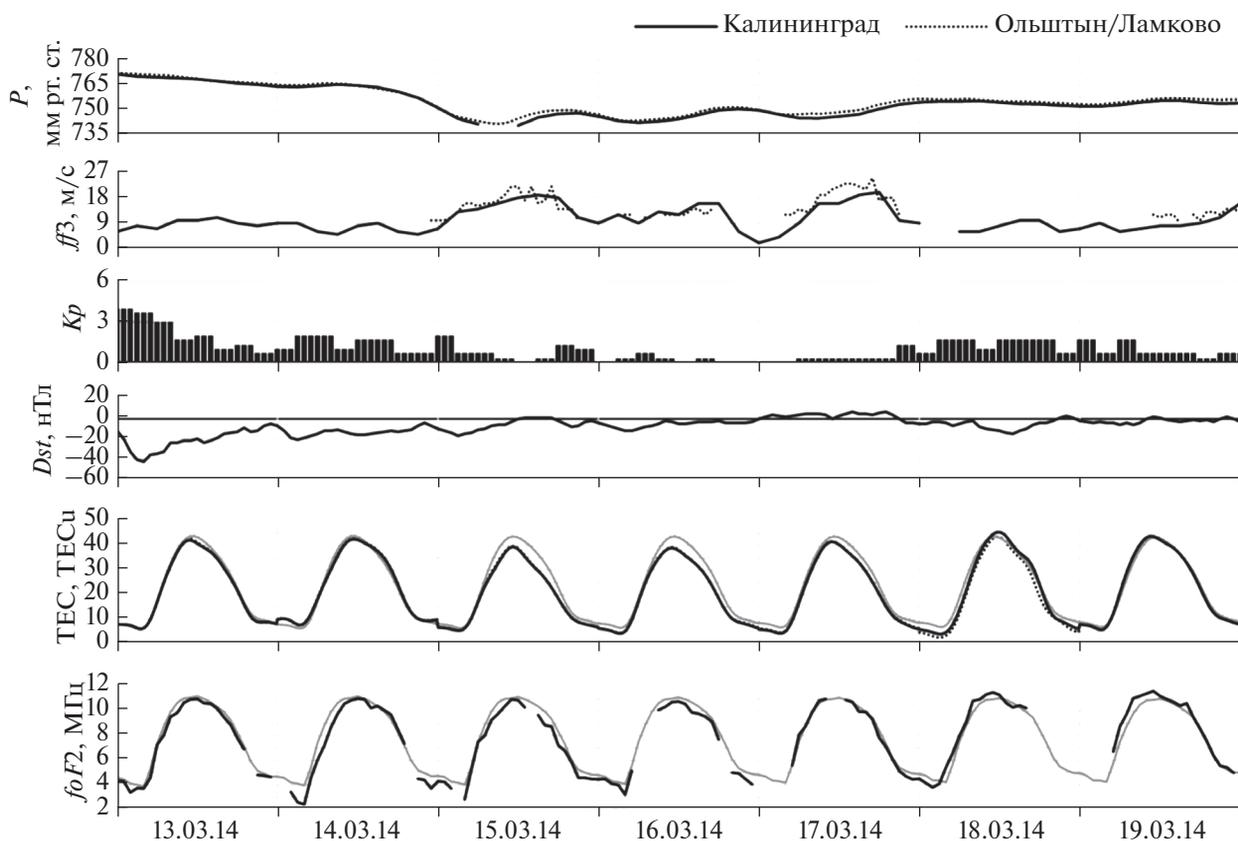


Рис. 4. То же, что и на рис. 1, но с 13 по 19 марта 2014 г.

чение TEC достигло 20% относительно осредненных величин, что соответствовало 2.4 стандартного отклонения. Увеличение критической частоты F_2 -слоя составило 19%, или 1.6 стандартного отклонения.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Во всех рассмотренных случаях, в условиях прохождения метеорологических штормов над Калининградской областью, с порывами ветра от 8 баллов по шкале Бофорта и выше, над областью метеорологического шторма возникали ионосферные возмущения, наблюдавшиеся на протяжении не менее 3 ч. При этом, в четырех случаях из шести возмущения над Калининградом вдвое превысили стандартное отклонение величины, и составили 18–64% для TEC и 13–28% для foF_2 . На ст. Херстмонсе Касл, расположенной западнее Калининграда, в эти дни ионосферные возмущения либо отсутствовали, либо были заметно слабее и не превысили 2σ и 17%.

Анализ рассмотренных событий позволяет заключить, что выявленные изменения состояния ионосферы обусловлены процессами, сопровождающими развитие метеорологических штормов.

Усиление процессов генерации АГВ в таких метеорологических условиях, по-видимому, является наиболее важным фактором, определяющим возмущение состояния ионосферы. Вертикальное распространение и диссипация АГВ в верхней атмосфере приводит к формированию локальных возмущений температуры и плотности термосферы, что в свою очередь влияет на ионизационно-рекомбинационные процессы в термосфере. К тому же, как показано в работе [Snively and Pasko, 2003], метеорологические источники возбуждают сравнительно короткопериодные АГВ, которые на высотах нижней термосферы могут усиливать турбулентные процессы. Усиление турбулентности на высотах нижней термосферы ведет к значительным изменениям газового состава термосферы и, в частности, к понижению концентрации атомарного кислорода. Влияние указанных процессов на ионосферу проявляется в усилении рекомбинационных процессов и снижению эффективности ионизационных процессов, что приводит к отрицательным эффектам в динамике TEC и foF_2 . Как следует из результатов анализа наблюдений, в большинстве случаев реакция ионосферы на метеорологические возмущения проявляется в снижении дневных значе-

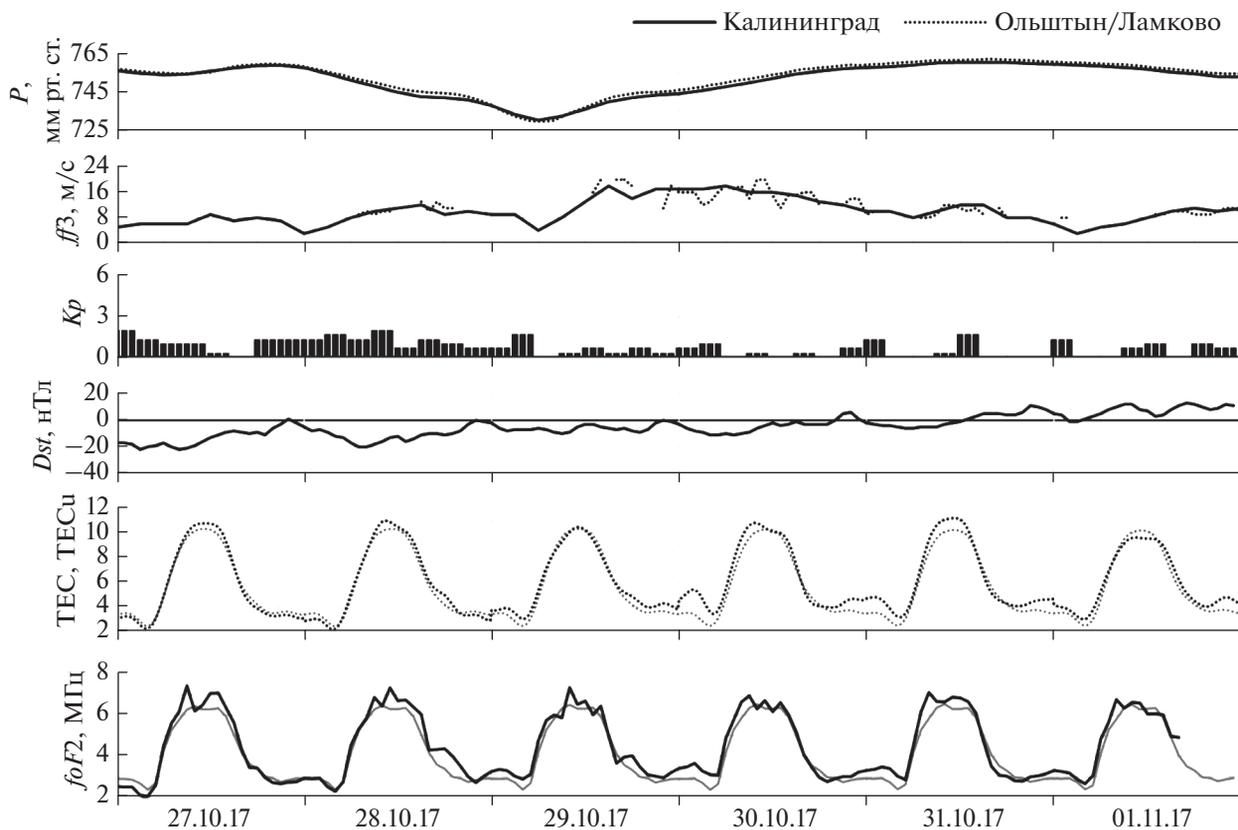


Рис. 5. То же, что и на рис. 1, но с 27 октября по 1 ноября 2017 г.

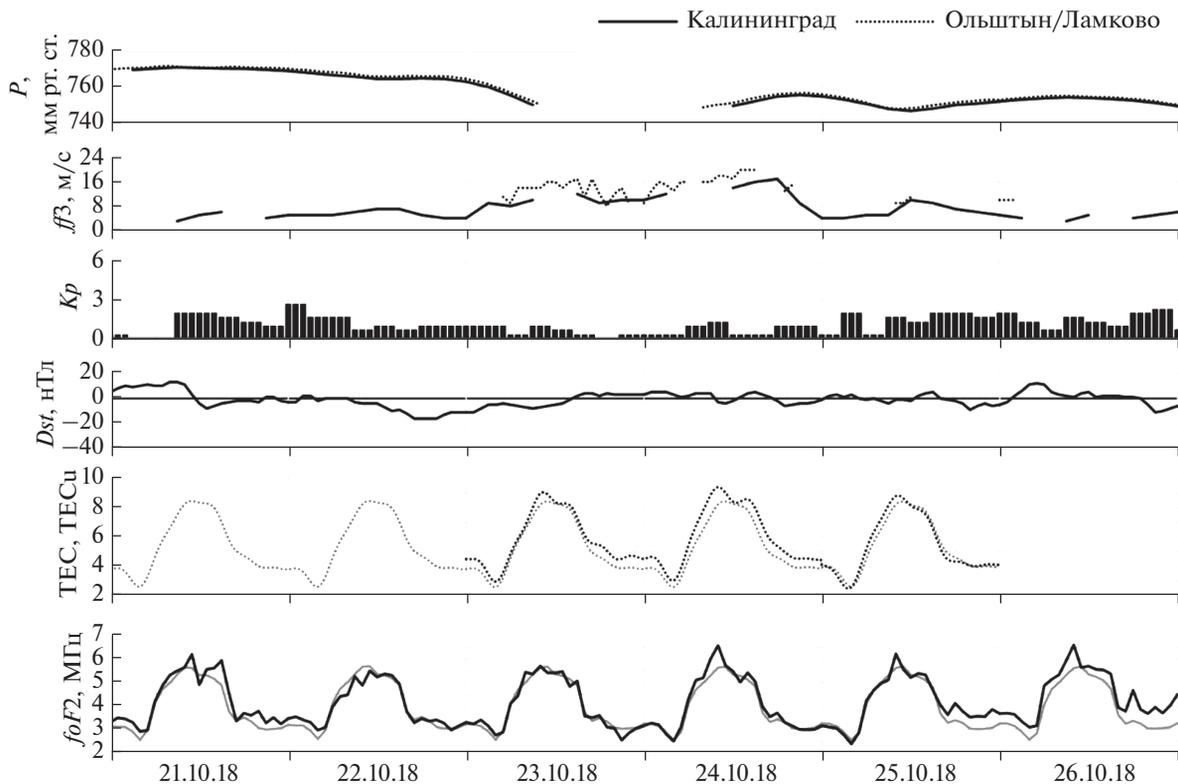


Рис. 6. То же, что и на рис. 1, но с 21 по 26 октября 2018 г.

ний ТЕС и $foF2$, что согласуется с представлениями о влиянии АГВ на термосферу.

Причины появления положительных возмущений, по-видимому, связаны с более сложными процессами. Так, в наблюдениях, представленных в работе [Карпов и др., 2019а, б], было показано, что положительные ионосферные эффекты возникают на границе зоны метеорологических возмущений. Можно предположить, что причины таких ионосферных эффектов могут быть связаны с процессами переноса плазмы из области крупномасштабного термосферного возмущения, сформировавшегося над эпицентром метеорологического шторма, находящегося севернее Калининграда.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, результаты анализа ионосферных возмущений, инициируемых метеорологическими штормами в Калининградском регионе за 2010–2018 гг., показали следующее.

1. Во всех рассмотренных случаях в условиях прохождения метеорологических штормов, с порывами ветра от 8 баллов по шкале Бофорта и выше, над областью метеорологического шторма возникают ионосферные возмущения, наблюдающиеся на протяжении не менее 3 ч.

2. В четырех из шести случаев амплитуды возмущений ионосферных параметров ТЕС и $foF2$ вдвое превысили стандартное отклонение от медианных значений, в двух случаях – от 1.6 до 2.0 стандартного отклонения.

3. Наиболее часто возникающие ионосферные возмущения проявляются в понижении дневных значений ТЕС и $foF2$ и реже – в повышении этих параметров.

4. Наиболее вероятной причиной отрицательных возмущений ионосферы являются процессы, связанные с диссипацией АГВ, распространяющиеся из области метеорологического шторма и усилением турбулентности в нижней термосфере.

5. Положительные ионосферные возмущения возникают в тех случаях, когда эпицентр метеорологического шторма находится в стороне от станции наблюдения. Причиной таких возмущений могут являться процессы переноса плазмы из области термосферного возмущения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований грант № 18-05-00184 (Карпов И.В.) и Правительства Калининградской области в рамках научного проекта № 19-45-393002 (Карпов М.И.).

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.
- Исаев Н.В., Костин В.М., Беляев Г.Г. и др. Возмущения верхней ионосферы, вызванные тайфунами // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 50. № 2. С. 253–264. 2010.
- Карпов И.В., Борчевкина О.П., Карпов М.И. Локальные и региональные возмущения ионосферы в периоды метеорологических возмущений // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 59. № 4. С. 492–500. 2019а.
- Карпов И.В., Карпов М.И., Борчевкина О.П. и др. Пространственно-временные вариации ионосферы во время метеорологического возмущения в декабре 2010 г. // Хим. физика. Т. 38. № 7. С. 79–85. 2019б.
- Карпов И.В., Кшевцевский С.П. Механизм формирования крупномасштабных возмущений в верхней атмосфере от источников АГВ на поверхности Земли // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 54. № 4. С. 513–522. 2014.
- Chernigovskaya M.A., Shpynev B.G., Ratovsky K.G. Meteorological effects of ionospheric disturbances from vertical radiosounding data // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 136. P. 235–243. 2015.
- Chou M.Y., Lin C.C.H., Yue J., et al. Concentric traveling ionosphere disturbances triggered by Super Typhoon Meranti (2016) // Geophys. Res. Lett. V. 44. № 3. P. 1219–1226. 2017.
- Fritts D.C., Alexander M.J. Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere // Rev. Geophys. V. 41. № 1. P. 1–68. 2003.
- Isaev N.V., Sorokin V.M., Chmyrev V.M. et al. Disturbance of the electric field in the ionosphere by sea storms and typhoons // Cosmic Res. V. 40. № 6. P. 547–553. 2002.
- Karpov I., Kshevetskii S. Numerical study of heating the upper atmosphere by acoustic-gravity waves from a 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. et al. 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.
- Li W., Yue J., Wu S. et al. Ionospheric responses to typhoons in Australia during 2005–2014 using GNSS and FORMOSAT-3/COSMIC measurements // GPS Solut. V. 22. № 61. 2018.
- Martinis C.R., Manzano J.R. The influence of active meteorological systems on the ionosphere F region // Ann. Geophys. V. 42. № 1. P. 1–7. 1999.
- Medvedev A.S., Gavrilov N.M. The nonlinear mechanism of gravity wave generation by meteorological motions in the atmosphere // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 57. P. 1221–1231. 1995.

- *Plougonven R., Snyder Ch.* Inertial gravity waves spontaneously generated by jets and fronts. Part I: Different Baroclinic Life Cycles // *J. Atmos. Sci.* V. 64. P. 2502–2520. 2007.
- *Plougonven R., Zhang F.* Internal gravity waves from atmospheric jets and fronts // *Rev. Geophys.* V. 52. № 1. P. 33–76. 2014.
- *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.
- *Schubert G., Hickey M.P., Walterscheid R.L.* Physical processes in acoustic wave heating of the thermosphere // *J. Geophys. Res.* V. 110. D07106. 2005.
- *Snively J.B., Pasko V.B.* Breaking of thunderstorm-generated gravity waves as a source of short-period ducted waves at mesopause altitudes // *Geophys. Res. Lett.* V. 30. № 24. 2003.
- *Song Q., Ding F. et al.* GPS detection of the ionospheric disturbances over China due to impacts of typhoon Rammasum and Matmo // *J. Geophys. Res.* V. 122. № 1. P. 1055–1063. 2016.