

ВЛИЯНИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ШТОРМОВ НА ОБЛАСТЬ E ИОНОСФЕРЫ В 2017–2018 гг.

IMPACT OF METEOROLOGICAL STORMS ON THE E-REGION OF THE IONOSPHERE IN 2017–2018

О.П. Борчевкина

Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Калининград, Россия, olgaborchevkina@gmail.com
Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия, olgaborchevkina@gmail.com

И.В. Карпов

Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Калининград, Россия, ivkarpov@inbox.ru
Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия, ivkarpov@inbox.ru

М.И. Карпов

Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Калининград, Россия, mikhailkarpov@hotmail.com
Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия, mikhailkarpov@hotmail.com

Н.А. Коренькова

Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Калининград, Россия, wdizmiran@gmail.com

В.И. Власов

Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Калининград, Россия, wdizmiran@gmail.com

В.С. Лещенко

Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Калининград, Россия, wdizmiran@gmail.com

O.P. Borchevkina

West Department of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS, Kaliningrad, Russia, olgaborchevkina@gmail.com
Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia, olgaborchevkina@gmail.com

I.V. Karpov

West Department of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS, Kaliningrad, Russia, ivkarpov@inbox.ru
Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia, ivkarpov@inbox.ru

M.I. Karpov

West Department of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS, Kaliningrad, Russia, mikhailkarpov@hotmail.com
Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia, mikhailkarpov@hotmail.com

N.A. Korenkova

West Department of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS, Kaliningrad, Russia, wdizmiran@gmail.com

V.I. Vlasov

West Department of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS, Kaliningrad, Russia, wdizmiran@gmail.com

V.S. Leshchenko

West Department of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS, Kaliningrad, Russia, wdizmiran@gmail.com

Аннотация. В работе представлены результаты наблюдений спорадического слоя E_s в период метеорологических возмущений в Калининграде в октябре 2017 и 2018 г. на фоне спокойных геомагнитных условий. В дни метеорологических штормов (29–30 октября 2017 и 23–24 октября 2018 г.) отмечались существенные изменения в динамике критической частоты E_s-слоя. Наблюдения возмущений атмосферных и ионосферных параметров в Калининградском регионе показывают, что задержка реакции ионосферы по отношению к времени максимальных возмущений атмосферных параметров составляет около трех часов. Причины возникновения наблюдаемых явлений на высотах E-области, по-видимому, обусловлены распространением акустико-гравитационных волн, генерируемых конвективными процессами в нижней атмосфере в периоды метеорологического шторма. Усиление турбулентных процессов в нижней термосфере приводит к увеличению плотности атмосферы и ускорению рекомбинационных процессов. За этим следует быстрое снижение концентрации ионов и соответственно кри-

Abstract. The paper presents the results of observations of the sporadic E_s layer during the period of meteorological disturbances in Kaliningrad in October 2017 and 2018 under quiet geomagnetic conditions. During the meteorological storms (October 29–30, 2017 and October 23–24, 2018), significant changes occurred in the dynamics of the E_s-layer critical frequency. Observations of atmospheric and ionospheric disturbances in the Kaliningrad region show that the delay between the ionospheric response and the moment of maximum disturbances in atmospheric parameters is about 3 hours. These phenomena at the heights of the E-region might have been caused by propagation of acoustic-gravity waves generated by convective processes in the lower atmosphere during periods of a meteorological storm. Intensification of turbulent processes in the lower thermosphere leads to an increase in the atmospheric density and, accordingly, to higher recombination rates. This leads to a rapid decrease in the concentration of ions and, consequently, to a decrease in the critical frequency of the sporadic layer below the sensitivity threshold of ionosondes.

тической частоты слоя E_s вплоть до частот ниже порога чувствительности ионозондов.

Ключевые слова: спорадический E-слой, акустико-гравитационные волны, атмосферно-ионосферные связи, метеорологические возмущения.

Keywords: sporadic E layer, acoustic-gravity waves, atmosphere-ionosphere coupling, meteorological disturbances.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время большое внимание уделяется исследованиям ионосферных возмущений, вызванных мощными динамическими процессами в нижней атмосфере и на поверхности Земли. Результаты экспериментальных исследований показывают, что развитие таких процессов приводит к возникновению ионосферных возмущений. Так, например, прохождение метеорологических штормов и ураганов сопровождается значительными возмущениями параметров F2-слоя ионосферы и полного электронного содержания (ионосферный параметр TEC) [Martinić, Manzano, 1999; Захаров, Куницын, 2012; Polyakova, Perevalova, 2013; Chernigovskaya et al., 2014, 2015; Koucká Knížová et al., 2015; Bogdanov et al., 2016; Карпов и др., 2016, 2019; Борчевкина, Карпов, 2017].

Гипотезы о взаимном влиянии процессов в различных слоях атмосферы основываются на представлениях о генерации атмосферных волн, в частности, акустико-гравитационных волн (АГВ), и их распространении при определенных условиях снизу в верхние слои атмосферы [Kazimirovsky et al., 2003; Lastovicka, 2006, Mathews, 1998]. Мощные метеорологические процессы (штормы, ураганы, тайфуны) являются источником генерации АГВ в атмосфере. Теоретические исследования показывают, что метеорологические источники возбуждают сравнительно короткопериодные АГВ [Snively, Pasko, 2003; Куницын и др., 2007]. АГВ с периодами, близкими периоду Вейселя—Брента, а также инфразвуковые волны, распространяясь из области возбуждения, могут достигать высот термосферы и ионосферы [Schubert et al., 2005]. Диссипация таких волн приводит к формированию локальных областей нагрева термосферы, что влияет на динамику и ионизационно-рекомбинационные процессы ионосферы [Карпов, Кшевецкий 2014; Karpov, Kshevetskii, 2017]. Процессы, обусловленные диссипацией возбуждаемых в условиях метеорологических возмущений АГВ, влияющие на ионосферные эффекты в F-области, могут оказаться неэффективными на высотах E-области. В теоретических работах [Карпов, Кшевецкий, 2014; Karpov, Kshevetskii, 2017] отмечается, что область диссипации таких волн, как правило, находится на высотах 250–300 км, что значительно выше E-слоя ионосферы.

Установлено, что в нижней ионосфере на высотах E-слоя имеется связь между проявлением волновой активности АГВ и возмущениями характеристик спорадических E-слоев (E_s -слоев). В частности, были обнаружены случаи, когда слой E_s и возмущение в F-области проявляли одинаковую периодичность [van Eyken et al., 1982, Mathews, 1998; Parkinson, Dyson, 1998]. Различные аспекты влияния АГВ

на слои E_s , включая влияние волн на неоднородность горизонтальных ветров на высотах E-слоя ионосферы, возмущение критической частоты слоя, а также рекомбинационные процессы в верхней мезосфере — нижней термосфере рассматриваются в работах [Пилипенко, Козак, 2012; Barta et al., 2017; Haldoupis, 2012; Šauli, Bourdillon, 2008; Didebulidze et al., 2015].

Таким образом, дальнейшее развитие представлений о динамике нижней ионосферы в условиях метеорологических возмущений предполагает накопление данных наблюдений и совершенствование физической интерпретации наблюдаемых явлений.

Целью данной работы является анализ вариаций параметров нижней атмосферы и слоя E_s в периоды метеорологических штормов в Калининграде в октябре 2017 и 2018 г.

ДАнные НАБЛЮДЕНИЙ

Особенность географического положения региона Юго-Восточной Балтики, где расположен Калининград, состоит в том, что он открыт проникновению западных транзитных воздушных масс. По материалам многолетних метеорологических наблюдений число дней с сильным ветром (>15 м/с) в Калининградском регионе составляет 28–38 в год, в отдельные годы — до 60 дней; на осенне-зимний период (ноябрь–январь) приходилась примерно половина штормовых дней. Сила наблюдаемых штормов обычно составляет 7–8 баллов (12–18 м/с), изредка 9–10 (18–25 м/с), в исключительных случаях ветер достигает силы 11–12 баллов (>25 м/с). Транзит атлантических циклонов происходит при отсутствии орографических препятствий, что и определяет местную специфику ветрового режима [Тупикин, 2003].

Возникающие в таких процессах экстремальные метеорологические явления могут влиять на устойчивость функционирования различных систем связи и навигации, в частности, спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS [Карпов и др., 2019].

В настоящей работе выполнен анализ возмущений нижней ионосферы по наблюдениям на ст. Калининград (54° N, 20° E) во время метеорологических штормов в октябре 2017 и 2018 г. Для описания метеорологической обстановки использовались трехчасовые измерения максимальных значений скорости ветра, а также атмосферного давления, приведенного к среднему уровню моря, по данным [https://rp5.ru]. В качестве дополнительного источника данных использовались часовые измерения метеорологической станции в Ольштыне (53° N, 20° E), Польша. Вариации слоя E_s определялись по 15-минутным измерениям критической частоты f_oE_s (МГц) и минимальной действующей высоты $h'E_s$

(км) с ионозонда «Парус-А» на полигоне Калининградского филиала ИЗМИРАН (54.36° N, 20.12° E).

К метеорологическим штормам относятся события, сопровождающиеся очень сильным длительным (более 6 ч) ветром обычно при прохождении циклона с большими или меньшими разрушениями на суше и сильным волнением на море. Ветер 17–24 м/с классифицируется как шторм и сильный шторм (8–9 баллов по шкале Бофорта) [Хромов, Мамонтова, 1974].

Для анализа были выбраны метеорологические штормы (29–30 октября 2017 и 23–24 октября 2018 г.), когда максимальная скорость ветра в Калининграде достигала 17 м/с и более, что соответствует 8 баллам и выше по шкале Бофорта. Эти события проходили в условиях низкой геомагнитной и солнечной активности. Критерием спокойных условий являлись значения индекса геомагнитной активности $K_p \leq 3$ в день события или предыдущие сутки, значение $-20 \leq Dst \leq 20$ нТл, которое не менялось более чем на 20 нТл в течение суток.

На рис. 1 представлены трехчасовые измерения максимальных значений скорости порывов ветра, атмосферного давления, приведенного к среднему уровню моря, по данным [<https://rp5.ru>], а также вариации геомагнитных индексов в период метеорологических штормов в октябре 2017 и 2018 г.

Видно, что анализируемые события проходили на фоне спокойных геомагнитных условий и возмущенных (штормовых) условий в нижней атмосфере.

На рис. 2, 3 представлены вариации критической частоты (f_oE_s , МГц) и минимальной действующей высоты слоя E_s ($h'E_s$, км) в период прохождения метеорологических штормов в октябре 2017, 2018 г.

Видно, что в период прохождения метеорологических возмущений (29–30 октября 2017 г. и 23 октября 2018 г.) наблюдается изменение характеристик слоя E_s , проявляющееся в снижении f_oE_s ниже порога чувствительности ионозонда (~2 МГц) и немонотонном изменении высоты слоя.

В октябре 2017 г. метеорологический шторм начался в 06 UT 29 октября и продолжался до 23 UT 30 октября (рис. 1). Быстрое понижение f_oE_s отмечено после 12 UT, а с 17:00 UT 29 октября до 6:00 30 октября и с 14:00 30 октября до 07:00 31 октября спорадический слой не наблюдался (рис. 2). В октябре 2018 г. область пониженного атмосферного давления у ст. Калининград регистрировалась с 06 UT 23 октября до 18 UT 24 октября (рис. 1). В некоторые периоды штормов отсутствуют данные о метеорологической обстановке, что, по-видимому, связано с неработающей аппаратурой на Земле. Исчезновение спорадического слоя в этот период отмечено с 14:00 23 октября до 7:00 24 октября (рис. 3). После прохождения метеорологических штормов наблюдаемые параметры E_s вернулись к доштормовым значениям.

Существенное снижение f_oE_s и соответственно электронной концентрации в E_s , которое наблюдается непосредственно во время метеорологического шторма и не наблюдается до и после исследуемого события, позволяет связать выявленные ионосферные возмущения с прохождением метеорологического шторма.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В настоящее время общепринятой является теория ветрового сдвига [Mathews, 1998; Haldoupis, 2012], объясняющая формирование спорадических слоев в E-области ионосферы на средних широтах потоками ионов, обусловленными неоднородностью вертикальной структуры горизонтальных ветров. Появление неоднородного нейтрального ветра может быть связано с различными динамическими процессами в нижней термосфере [Haldoupis et al., 2006; Pignalberi et al., 2014].

Несмотря на спорадичность появления слоя E_s , в вариациях его параметров проявляются закономерности, позволяющие говорить о регулярности этих вариаций [Брюнелли, Намгаладзе, 1988]. Так, в представленных наблюдениях динамики слоя E_s (рис. 2, 3) отчетливо прослеживаются ночные слои, обусловленные металлическими ионами, утреннее увеличение высоты и f_oE_s в дни, предшествующие прохождению метеорологических возмущений. В дни метеорологических штормов (29–30.10.2017 и 23–24.10.2018) отмечались существенные изменения в динамике параметров слоя E_s . Спорадический слой в эти периоды отмечается только в дневное время. После окончания штормовых условий в Калининградском регионе параметры слоя E_s восстанавливаются до значений, наблюдаемых в дни, предшествующие метеорологическим возмущениям. Похожие изменения параметров слоя E_s наблюдались в периоды прохождения летних грозовых фронтов в Европе в 2013–2014 гг. [Barta et al., 2017]. В этих исследованиях было показано, что через 1–2 ч после того как грозовые фронты проходили через область наблюдений, происходило понижение f_oE_s ниже порога чувствительности ионозондов (~2 МГц). В работе [Barta et al., 2017] с помощью анализа результатов наблюдений сделан вывод, что наиболее вероятной причиной возмущения слоя E_s являются АГВ, генерируемые в тропосфере и мезосфере в период прохождения грозовых фронтов.

Наблюдения возмущений атмосферных и ионосферных параметров в Калининградском регионе (рис. 1–3) показывают также, что задержка реакции ионосферы по отношению к времени максимальных возмущений атмосферных параметров составляет ~3 ч. Такие значения вполне согласуются с представлениями о возмущениях ионосферы, инициируемые АГВ тропосферного происхождения. Отметим также, что представленные в данной работе результаты наблюдений получены в условиях метеорологических штормов, проходивших в осенний период без повышения грозовой активности. Следовательно, генерация АГВ в основном обусловлена конвективными процессами в тропосфере.

Исследованию влияния АГВ на спорадические слои в E-области ионосферы посвящены многочисленные экспериментальные и теоретические работы [Mathews, 1998; Fukao et al., 1998; Parkinson, Dyson, 1998; Bourdillon et al., 1997; Scotto, 1995; Пилипенко, Козак, 2012; Snively, Pasko, 2003; Liperovsky et al., 2000], в которых рассматривались различные аспекты влияния АГВ, включая влияние волн на неоднород-

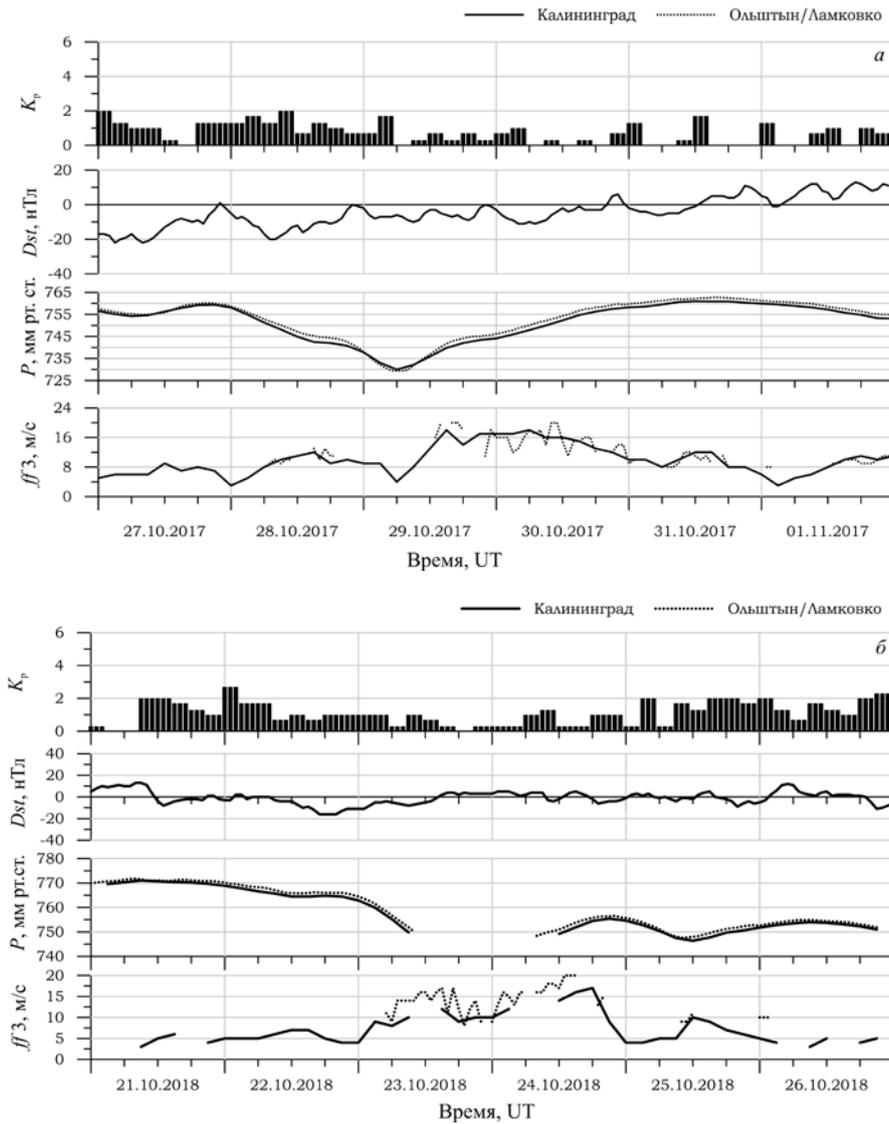


Рис. 1. Вариации атмосферного давления P , максимальной скорости порывов ветра $ff3$, индексов геомагнитной активности K_p и Dst в Калининграде и Ольштыне 27 октября – 1 ноября 2017 (а) и 21–26 октября 2018 г. (б)

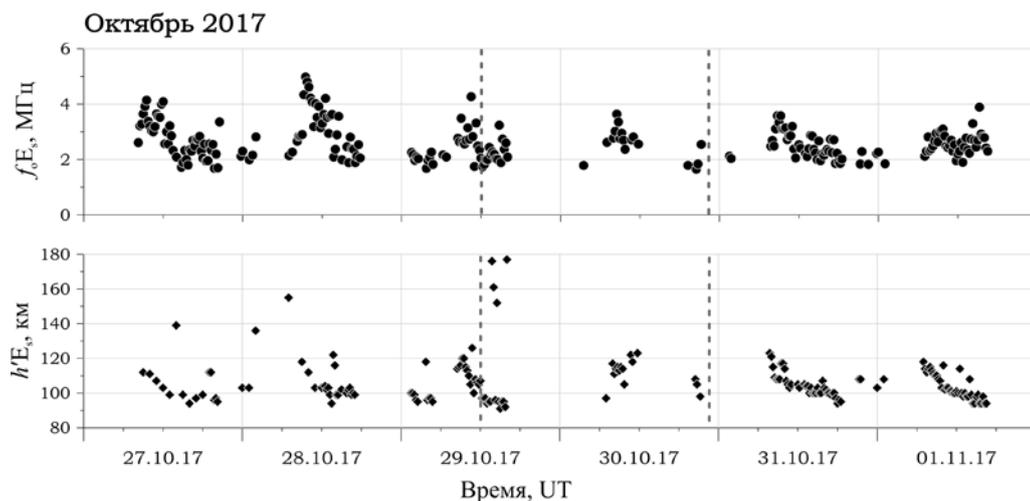


Рис. 2. Временные вариации критической частоты f_oE_s и минимальной высоты $h'E_s$ спорадического слоя E_s 27 октября — 1 ноября 2017 г. по данным вертикального зондирования на ст. Калининград. Штриховыми линиями показано время метеорологического шторма.

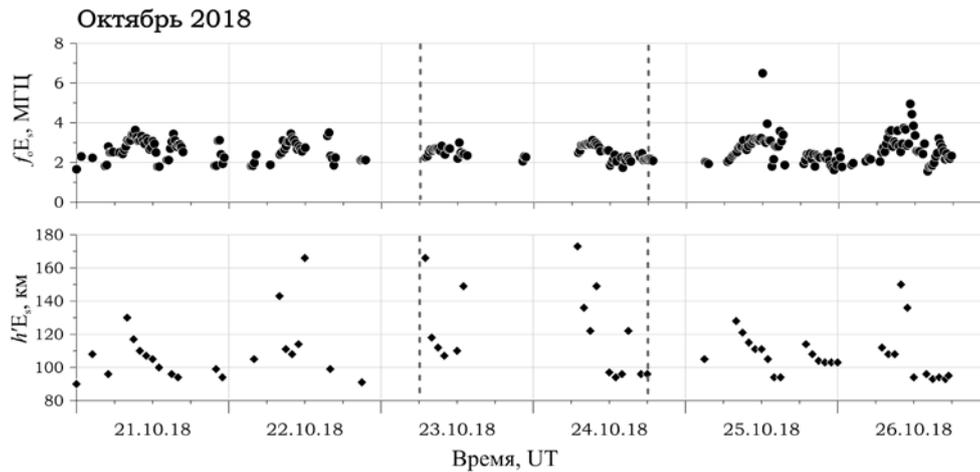


Рис. 3. Временные вариации критической частоты f_oE_s и минимальной высоты $h'E_s$ спорадического слоя E_s 21–29 октября 2018 г. по данным вертикального зондирования на ст. Калининград. Штриховыми линиями показано время метеорологического шторма

ность горизонтальных ветров E-области ионосферы, возмущение критической частоты слоя, рекомбинационные процессы в верхней мезосфере — нижней термосфере.

Малые временные задержки реакции ионосферы (2–3 ч) на возмущения тропосферы позволяют ограничить спектральный диапазон АГВ, возбуждаемых в атмосфере и проникающих до высот ионосферы. В работе [Snively, Pasko, 2003] было показано, что в условиях метеорологических возмущений возбуждаются АГВ с небольшими периодами, которые, распространяясь практически вертикально, в течение 2–3 ч могут достигать высот ионосферы. Аналогичные выводы следуют из работы [Карпов, Кшевецкий, 2014]. Эффекты диссипации таких АГВ в силу малости их периодов находятся на высотах 250–300 км. В таком случае можно предполагать, что эффекты диссипации таких волн не будут оказывать существенного влияния на динамику E_s . С другой стороны, вертикальное распространение таких волн и рост амплитуды с высотой может приводить к обрушению волн на высотах нижней термосферы, что оказывает существенное влияние на турбулентные процессы.

Усиление турбулентных процессов в нижней термосфере приводит к повышению плотности атмосферы и повышению интенсивности рекомбинационных процессов. В результате быстро снижаются концентрация ионов и соответственно f_oE_s вплоть до частот ниже порога чувствительности ионозондов. Можно предположить, что именно такие процессы приводят к возмущениям динамики E_s -слоя в периоды метеорологических возмущений.

ВЫВОДЫ

Представлены результаты наблюдений динамики атмосферы и спорадического слоя E_s в Калининградском регионе в период прохождения двух метеорологических штормов в октябре 2017 и 2018 г. Результаты наблюдений показали, что в условиях достаточно сильных метеорологических возмущений, когда скорость порывов ветра достигает 8 баллов и выше по шкале Бофорта, отмечается существ-

венное понижение f_oE_s . В такие периоды спорадический слой появляется только в дневное время и исчезает в ночное. Временная задержка реакции ионосферы по отношению к времени проявления максимальных возмущений атмосферных параметров составляет ~3 ч. Реакция спорадического слоя в условиях метеорологических возмущений весьма схожа с реакцией ионосферы, отмеченной при прохождении грозных фронтов.

Причины возникновения наблюдаемых явлений на высотах E-области, по-видимому, обусловлены распространением АГВ, генерируемых конвективными процессами в нижней атмосфере в периоды метеорологического шторма. Принимая во внимание малые временные задержки (2–3 ч) появления ионосферной реакции на возмущения в нижней атмосфере, можно предположить, что влияние АГВ проявляется в усилении турбулентных процессов в нижней термосфере. Это, в свою очередь, ведет к повышению плотности нижней термосферы и эффективности рекомбинационных процессов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Калининградской области, грант № 19-45-390005 (О.П. Борчевкина, М.И. Карпов) и гранта РФФИ № 18-05-00184 (И.В. Карпов).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Борчевкина О.П., Карпов И.В. Ионосферные неоднородности в периоды метеорологических возмущений // Геомагнетизм и аэронавигация. 2017. Т. 57, № 5. С. 670–675. DOI: [10.7868/S0016794017040046](https://doi.org/10.7868/S0016794017040046).
- Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988. 528 с.
- Захаров В.И., Куницын В.Е. Региональные особенности атмосферных проявлений тропических циклонов по данным наземных GPS-сетей // Геомагнетизм и аэронавигация. 2012. Т. 52, № 4. С. 562–574.
- 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](https://doi.org/10.7868/S001679401404018X).
- Карпов И.В., Борчевкина О.П., Дадашев Р.З., Ильминская А.В. Влияние метеорологических штормов на пара-

метры ионосферы в Балтийском регионе в 2010 г. // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2, № 2. С. 64–68. DOI: [10.12737/18653](https://doi.org/10.12737/18653).

Карпов И.В., Борчевкина О.П., Карпов М.И. Локальные и региональные возмущения ионосферы в периоды метеорологических возмущений // Геомагнетизм и аэрномия. 2019. Т. 59. № 4, С. 492–500. DOI: [10.1134/S0016794019040102](https://doi.org/10.1134/S0016794019040102).

Куницын В.Е., Сураев С.Н., Ахмедов Р.Р. Моделирование распространения акустико-гравитационных волн в атмосфере для различных поверхностных источников // Вестник Московского университета. Сер. 3. Физика. Астрономия. 2007. № 2. С. 59–63.

Пилипенко С.Г., Козак Л.В. Ветровые сдвиги в атмосфере Земли над мощными ураганами // Космическая наука и технология. 2012. Т. 18, № 6. С. 43–50. DOI: [10.15407/knit2012.06.043](https://doi.org/10.15407/knit2012.06.043).

Тулкин С. Н. Структурный анализ штормовых ветров в Юго-Восточной Балтике и Калининградской области // Комплексное изучение бассейна Атлантического океана: сб. науч. тр. Калининград, 2003. С. 59–63.

Хромов С.П., Мамонтова Л.И. Метеорологический словарь. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 568 с.

Barta V., Haldoupis C., Satori G., et al. Searching for effects caused by thunderstorms in mid-latitude sporadic E layers // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2017. V. 161. P. 150–159. DOI: [10.1016/j.jastp.2017.06.006](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.06.006).

Bogdanov V., Kaysin A., Romanov A. Impact of cyclones over Kamchatka on electron distribution in the ionosphere // E3S Web of Conferences. 2016. V. 11, N 00003. DOI: [10.1051/e3sconf/20161100003](https://doi.org/10.1051/e3sconf/20161100003).

Bourdillon A., Lefur E., Haldoupis C., et al. Decameter mid-latitude sporadic-E irregularities in relation with gravity waves // Ann. Geophys. 1997. V. 15. P. 925–934. DOI: [10.1007/s00585-997-0925-1](https://doi.org/10.1007/s00585-997-0925-1).

Chernigovskaya M.A., Kurkin V.I., Oinats A.V., Poddelsky I.N. Ionosphere effects of tropical cyclones over the Asian region of Russia according to oblique radio sounding data // Proc. SPIE 9292 — The International Society for Optical Engineering. 2014. V. 92925E. DOI: [10.1117/12.2073391](https://doi.org/10.1117/12.2073391).

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(B). P. 235–243. DOI: [10.1016/j.jastp.2015.07.006](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2015.07.006).

Didebulidze G. G., Dalakishvili G., Lomidze L., Matiashvili G. Formation of sporadic-E (E_s) layers under the influence of AGWs evolving in a horizontal shear flow // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2015. V. 136(B). P. 163–173. DOI: [10.1016/j.jastp.2015.09.012](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2015.09.012).

Fukao S., Yamamoto M., Tsunoda R. T., et al. The SEEK (Sporadic-E Experiment over Kyushu) Campaign // Geophys. Res. Lett. 1998. V. 25, N 11. P. 1761–1764. DOI: [10.1029/98GL00932](https://doi.org/10.1029/98GL00932).

Haldoupis C. Midlatitude sporadic E. A typical paradigm of atmosphere-ionosphere coupling // Space Sci. Rev. 2012. V. 168, N 1-4. P. 441–461. DOI: [10.1007/s11214-011-9786-8](https://doi.org/10.1007/s11214-011-9786-8).

Haldoupis C., Meek C., Christakis N., et al. Ionogram height-time-intensity observations of descending sporadic E layers // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2006. V. 68, iss. 3-5. P. 539–557. DOI: [10.1016/j.jastp.2005.03.020](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2005.03.020).

Karpov I.V., Kshevetskii S.P. 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. 2017. V. 164. P. 89–96. DOI: [10.1016/j.jastp.2017.07.019](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.07.019).

Kazimirovsky E., Herraiz M., Morena A.D.L.B. Effects on the ionosphere due to phenomena occurring below it // Surveys in Geophysics. 2003. V. 24, iss. 2. P. 139–184. DOI: [10.1023/A:1023206426746](https://doi.org/10.1023/A:1023206426746).

Koucká Knížová P., Mošna Z., Kouba D., et al. Influence of meteorological systems on the ionosphere over Europe // J. At-

mos. Solar-Terr. Phys. 2015. V. 136. P. 244–250. DOI: [10.1016/j.jastp.2015.07.017](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2015.07.017).

Laštovička J. Forcing of the ionosphere by waves from below // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2006. V. 68, N 3. P. 479–497. DOI: [10.1016/j.jastp.2005.01.018](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2005.01.018).

Liperovsky V.A., Pokhotelov E.V., Liperovskaya E.V., et al. Modification of sporadic E-layers caused by seismic activity // Surveys in Geophysics. 2000. V. 21. P. 449–486. DOI: [10.1023/A:1006711603561](https://doi.org/10.1023/A:1006711603561).

Martiniš C.R., Manzano J.R. The influence of active meteorological systems on the ionosphere F region // Ann. Geophys. 1999. V. 42, N 1. P. 1–7. DOI: [10.4401/ag-3708](https://doi.org/10.4401/ag-3708).

Mathews J.D. Sporadic E: current views and recent progress // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 1998. V. 60, iss. 4. P. 413–435. DOI: [10.1016/S1364-6826\(97\)00043-6](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(97)00043-6).

Parkinson M.L., Dyson P.L. Measurements of mid-latitude E-region, sporadic-E, and TID-related drifts using HF Doppler-sorted interferometry // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 1998. V. 60, iss. 5. P. 509–522. DOI: [10.1016/S1364-6826\(97\)00058-8](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(97)00058-8).

Pignatelli A., Pezzopane M., Zuccheretti E. Sporadic E layer at mid-latitudes: average properties and influence of atmospheric tides // Ann. Geophys. 2014. V. 32, iss. 11. P. 1427–1440. DOI: [10.5194/angeo-32-1427-2014](https://doi.org/10.5194/angeo-32-1427-2014).

Polyakova A.S., Perevalova N.P. Comparative analysis of TEC disturbances over tropical cyclone zones in the North-West Pacific Ocean // Adv. Space Res. 2013. V. 52, iss. 8. P. 1416–1426. DOI: [10.1016/j.asr.2013.07.029](https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.07.029).

Šauli P., Bourdillon A. Height and critical frequency variations of the sporadic-E layer at midlatitudes // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2008. V. 70, iss. 15. P. 1904–1910. DOI: [10.1016/j.jastp.2008.03.016](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2008.03.016).

Schubert G., Hickey M.P., Walterscheid R.L., Physical processes in acoustic wave heating of the thermosphere // J. Geophys. Res. 2005. V. 110. P. D07106. DOI: [10.1029/2004JD005488](https://doi.org/10.1029/2004JD005488).

Scotto C. Sporadic-E layer and meteorological activity // Ann. Geophys. 1995. V. 38, N 1. P. 21–24. DOI: [10.4401/ag-4129](https://doi.org/10.4401/ag-4129).

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. 2003. V. 30, iss. 24. P. 2254. DOI: [10.1029/2003GL018436](https://doi.org/10.1029/2003GL018436).

van Eyken A.P., Williams P.J.S., Maude A.D., Morgani G. Atmospheric gravity waves and sporadic-E // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 1982. V. 44, iss. 1. P. 25–29. DOI: [10.1016/0021-9169\(82\)90089-7](https://doi.org/10.1016/0021-9169(82)90089-7).

URL: <https://rp5.ru> (дата обращения 16 сентября 2019 г.).

REFERENCES

Barta V., Haldoupis C., Satori G., Buresova D., Chum J., Pozoga M., et al. Searching for effects caused by thunderstorms in midlatitude sporadic E layers. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2017, vol. 161, pp. 150–159. DOI: [10.1016/j.jastp.2017.06.006](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.06.006).

Bogdanov V., Kaysin A., Romanov A. Impact of cyclones over Kamchatka on electron distribution in the ionosphere. *E3S Web of Conferences*. 2016, vol. 11, no. 00003. DOI: [10.1051/e3sconf/20161100003](https://doi.org/10.1051/e3sconf/20161100003).

Borchevkina O.P., Karpov I.V. Ionospheric irregularities in periods of meteorological disturbances. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2017, vol. 57, no. 5, pp. 624–629. DOI: [10.1134/S0016793217040041](https://doi.org/10.1134/S0016793217040041).

Bourdillon A., Lefur E., Haldoupis C., Le Roux Y., Menard J., Delloue J. Decameter mid-latitude sporadic-E irregularities in relation with gravity waves. *Ann. Geophys.* 1997, vol. 15, pp. 925–934. DOI: [10.1007/s00585-997-0925-1](https://doi.org/10.1007/s00585-997-0925-1).

Bryunelli B.E., Namgaladze A.A. *Fizika ionosfery* [Physics of the Ionosphere]. Moscow, Nauka Publ., 1988, 528 p. (In Russian).

Chernigovskaya M.A., Kurkin V.I., Oinats A.V., Poddelsky I.N. Ionosphere effects of tropical cyclones over the

Asian region of Russia according to oblique radio-sounding data. *Proc. SPIE 9292 — The International Society for Optical Engineering*. 2014, vol. 9292E. DOI: [10.1117/12.2073391](https://doi.org/10.1117/12.2073391).

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(B), pp. 235–243. DOI: [10.1016/j.jastp.2015.07.006](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2015.07.006).

Didebulidze G. G., Dalakishvili G., Lomidze L., Matiasvili G. Formation of sporadic-E (E_s) layers under the influence of AGWs evolving in a horizontal shear flow. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2015, vol. 136(B), pp. 163–173. DOI: [10.1016/j.jastp.2015.09.012](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2015.09.012).

Fukao S., Yamamoto M., Tsunoda R. T., Hayakawa H., Mukai T. The SEEK (Sporadic-E Experiment over Kyushu) Campaign. *Geophys. Res. Lett.* 1998, vol. 25, no. 11, pp. 1761–1764. DOI: [10.1029/98GL00932](https://doi.org/10.1029/98GL00932).

Haldoupis C. Midlatitude sporadic E. A typical paradigm of atmosphere-ionosphere coupling. *Space Sci. Rev.* 2012, vol. 168, no. 1–4, pp. 441–461. DOI: [10.1007/s11214-011-9786-8](https://doi.org/10.1007/s11214-011-9786-8).

Haldoupis C., Meek C., Christakis N., Pancheva D., Bourdillon A. Ionogram height-time-intensity observations of descending sporadic E layers. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2006, vol. 68, iss. 3–5, pp. 539–557. DOI: [10.1016/j.jastp.2005.03.020](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2005.03.020).

Karpov I.V., Kshevetskii S.P. Formation of large-scale disturbances in the upper atmosphere caused by acoustic gravity wave sources on the Earth's surface. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2014, vol. 54, no. 4, pp. 513–522. DOI: [10.1134/S0016793214040173](https://doi.org/10.1134/S0016793214040173).

Karpov I.V., Kshevetskii S.P. 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.* 2017, vol. 164, pp. 89–96. DOI: [10.1016/j.jastp.2017.07.019](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.07.019).

Karpov I.V., Borchevskina O.P., Dadashev R.Z., Ilminskaya A.V. Influence of meteorological storms on ionospheric parameters in the Baltic region in 2010. *Solar-Terr. Phys.* 2016, vol. 2, no. 2, pp. 77–81. DOI: [10.12737/21001](https://doi.org/10.12737/21001).

Karpov I.V., Borchevskina O.P., Karpov M.I. Local and regional ionospheric disturbances during meteorological disturbances. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2019, no. 4, pp. 458–466. DOI: [10.1134/S0016793219040108](https://doi.org/10.1134/S0016793219040108).

Kazimirovsky E., Herraiz M., Morena A.D.L.B. Effects on the ionosphere due to phenomena occurring below it. *Surveys in Geophysics*. 2003, vol. 24, iss. 2, pp. 139–184. DOI: [10.1023/A:1023206426746](https://doi.org/10.1023/A:1023206426746).

Khromov S. P., Mamontova L. I. *Meteorologicheskii slovar* [Meteorological Dictionary]. Leningrad, Hydrometeo-izdat Publ., 1974, 568 p. (In Russian).

Koucká Knížová P., Mošna Z., Kouba D., Potužníková K., Boška J. Influence of meteorological systems on the ionosphere over Europe. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2015, vol. 136, pp. 244–250. DOI: [10.1016/j.jastp.2015.07.017](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2015.07.017).

Kunitsyn V.E., Suraev S.N., Akhmedov, R.R. Modeling the propagation of acoustic gravity waves in the atmosphere for different surface sources. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. Fizika. Astronomiya* [Moscow University Physics Bulletin]. 2007, iss. 3, no. 2, pp. 59–63. (In Russian).

Laštovička J. Forcing of the ionosphere by waves from below. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2006, vol. 68, no. 3, pp. 479–497. DOI: [10.1016/j.jastp.2005.01.018](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2005.01.018).

Liperovsky V.A., Pokhotelov E.V., Liperovskaya E.V., Parrot M., Meister C.-V., Alimov O.A. Modification of sporadic E-layers caused by seismic activity. *Surveys in Geophys.* 2000, vol. 21, pp. 449–486. DOI: [10.1023/A:1006711603561](https://doi.org/10.1023/A:1006711603561).

Martinis C.R., Manzano. J.R. The influence of active meteorological systems on the ionosphere F region. *Ann. Geophys.* 1999, vol. 42, no. 1, pp. 1–7. DOI: [10.4401/ag-3708](https://doi.org/10.4401/ag-3708).

Mathews J.D., Sporadic E: current views and recent progress. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 1998, vol. 60, iss. 4, pp. 413–435. DOI: [10.1016/S1364-6826\(97\)00043-6](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(97)00043-6).

Parkinson M.L., Dyson P.L. Measurements of mid-latitude E-region, sporadic-E, and TID-related drifts using HF Doppler-sorted interferometry. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 1998, vol. 60, iss. 5, pp. 509–522. DOI: [10.1016/S1364-6826\(97\)00058-8](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(97)00058-8).

Pignalberi A., Pezzopane M., Zuccheretti E. Sporadic E layer at mid-latitudes: average properties and influence of atmospheric tides. *Ann. Geophysic.* 2014, vol. 32, iss. 11, pp. 1427–1440. DOI: [10.5194/angeo-32-1427-2014](https://doi.org/10.5194/angeo-32-1427-2014).

Pilipenko S. G., Kozak L. V. Wind shifts in the Earth's atmosphere over powerful hurricanes. *Kosmicheskaya nauka i tekhnologiya* [Space Science and Technology]. 2012, vol. 18, no. 6, pp. 43–50. DOI: [10.15407/knit2012.06.043](https://doi.org/10.15407/knit2012.06.043). (In Russian).

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, iss. 8, pp. 1416–1426. DOI: [10.1016/j.asr.2013.07.029](https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.07.029).

Šauli P., Bourdillon A. Height and critical frequency variations of the sporadic-E layer at midlatitudes. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2008, vol. 70, iss. 15, pp. 1904–1910. DOI: [10.1016/j.jastp.2008.03.016](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2008.03.016).

Schubert G., Hickey M.P., Walterscheid R.L., Physical processes in acoustic wave heating of the thermosphere. *J. Geophys. Res.* 2005, vol. 110, pp. D07106. DOI: [10.1029/2004JD005488](https://doi.org/10.1029/2004JD005488).

Scotto C., Sporadic-E layer and meteorological activity. *Ann. Geophys.* 1995, vol. 38, no. 1, pp. 21–24. DOI: [10.4401/ag-4129](https://doi.org/10.4401/ag-4129).

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.* 2003, vol. 30, iss. 24, pp. 2254. DOI: [10.1029/2003GL018436](https://doi.org/10.1029/2003GL018436).

Tupikin S.N. Structural analysis of storm winds in the South-Eastern Baltic and the Kaliningrad region. *Kompleksnoe izuchenie basseina Atlanticheskogo okeana: Sb. nauchnykh trudov* [Proc. “Comprehensive Study of the Atlantic Ocean Basin”]. Kaliningrad, 2003, pp. 59–63. (In Russian).

van Eyken A.P., Williams P.J.S., Maude A.D., Morgani G. Atmospheric gravity waves and sporadic-E. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 1982, vol. 44, iss. 1, pp. 25–29. DOI: [10.1016/0021-9169\(82\)90089-7](https://doi.org/10.1016/0021-9169(82)90089-7).

Zakharov V.I., Kunitsyn V.E. Regional features of atmospheric manifestations of tropical cyclones according to ground-based GPS network data. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2012, vol. 52, no. 4, pp. 533–545. DOI: [10.1134/S0016793212040160](https://doi.org/10.1134/S0016793212040160).

URL: <https://rp5.ru> (accessed September 16, 2019).

Как цитировать эту статью

Борчевкина О.П., Карпов И.В., Карпов М.И., Коренькова Н.А., Власов В.И., Лещенко В.С. Влияние метеорологических штормов на область E ионосферы в 2017–2018 гг. *Солнечно-земная физика* 2020. Т. 6, № 4. С. 86–92. DOI: [10.12737/szf-64202011](https://doi.org/10.12737/szf-64202011).