

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ИОНОСФЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ, ВЫЗВАННЫХ ПРОХОЖДЕНИЕМ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ШТОРМОВ

© 2020 г. И. В. Карпов<sup>1,2\*</sup>, О. П. Борчевкина<sup>1,2</sup>, П. А. Васильев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта, Калининград, Россия

<sup>2</sup>Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук, Калининград, Россия

\*E-mail: ivkarpov@inbox.ru

Поступила в редакцию 20.02.2019;

после доработки 14.05.2019;

принята в печать 20.05.2019

В работе представлены результаты численного моделирования ионосферных возмущений от точечного термосферного источника нагрева, имитирующего эффект диссипации акустико-гравитационных волн, распространяющихся из области метеорологического шторма. Показано, что ионосферные эффекты имеют обширную пространственную структуру и сильнее проявляются днем, чем ночью. В результатах численного моделирования отмечается понижение критической частоты F2-слоя ( $f^oF2$ ) и полной электронной концентрации к северо-западу от максимума источника нагрева, а также повышение значений этих параметров к югу и юго-востоку от максимума источника вплоть до экваториальной области. Приведен сравнительный анализ дневных и ночных возмущений атмосферных параметров и сделан вывод о причинах слабовыраженных изменений в ночной ионосфере.

*Ключевые слова:* ионосфера, акустико-гравитационные волны, термосфера, численный эксперимент.

DOI: 10.31857/S0207401X20040081

### ВВЕДЕНИЕ

В экспериментальных исследованиях установлено, что активные динамические процессы в нижней атмосфере, такие как тайфуны, ураганы, штормы, являются причиной разнообразных ионосферных возмущений [1–5]. Так, в наблюдениях динамики ионосферы в периоды метеорологических возмущений выявлены значительные понижения значений полной электронной концентрации (total, electron, content (ТЕС), возникающие над областью метеорологических возмущений [6]. В частности, в многочисленных наблюдениях, выполненных в Калининградском регионе в периоды резких ухудшений погодных условий, сопровождающихся шквалистыми усилениями ветра до 8–9 баллов по шкале Бофорта, отмечались понижения преимущественно дневных значений ТЕС, достигающие ~50% по отношению к метеоспокойным условиям [7]. Особенности наблюдаемых ионосферных возмущений состоят в том, что они возникают непосредственно над областью шторма и устойчиво коррелируют по времени с увеличением скорости порывов ветра в области шторма [6, 7].

В работах [6, 8] высказано предположение, что причиной таких ионосферных возмущений может быть диссипация акустико-гравитационных волн (АГВ), возбуждаемых в области метеороло-

гического возмущения и распространяющихся в верхнюю атмосферу. Можно предположить, что шквалистый характер ветра в периоды метеорологических возмущений отражает процессы усиления генерации АГВ. Теоретические исследования показывают, что инфразвуковые волны и АГВ с периодами, близкими к периоду Вайсяля–Брента, распространяясь из области возбуждения практически вертикально, могут достигать высот термосферы и ионосферы [9–11]. Диссипация таких волн приводит к формированию локальных областей нагрева термосферы [11, 12], что может влиять на динамику ионосферы и ионизационно-рекомбинационные процессы.

Цель настоящей работы – модельное исследование реакции верхней атмосферы и ионосферы на возникновение локального теплового возмущения термосферы, имитирующего эффект диссипации волн, распространяющихся из области метеорологического возмущения.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ОПИСАНИЕ ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Для оценки пространственной структуры и амплитуды источника возмущения термосферы вследствие диссипации АГВ были использованы

расчеты, выполненные в теоретическом исследовании [13]. В этой работе было показано, что распространение от поверхности Земли инфразвуковых волн и АГВ с периодами, близкими к периоду Вайсяля–Брента, приводит к формированию над источником возмущений на высотах  $\sim 200$  км нагретой области вследствие диссипации волн. Задание на поверхности Земли амплитуд волновых возмущений, характерных для метеостормов, приводит к нагреву термосферы при таких процессах на  $\sim 100$  К.

С целью исследования воздействия дополнительного термосферного источника нагрева на параметры верхней атмосферы и ионосферы были проведены численные эксперименты с использованием глобальной самосогласованной модели термосферы–ионосферы–протоносферы (ГСМ ТИП) [14]. Модель ГСМ ТИП позволяет рассчитывать глобальные распределения термосферных и ионосферных параметров в области высот от 80 до 500 км и успешно применяется для исследования крупномасштабных процессов в верхней атмосфере [15–17].

Для моделирования влияния источника, имитирующего эффект диссипации АГВ, на состояние термосферы и ионосферы в уравнение теплового баланса термосферы в модели ГСМ ТИП в точке с заданными широтой и долготой был включен дополнительный источник нагрева  $Q$ , определяемый выражением

$$Q \text{ [К/мин]} = A \exp\left(-\frac{|r - r_0|}{H}\right), \quad (1)$$

где  $r$  – высота,  $r_0 = 180$  км – высота максимума источника нагрева,  $H$  – высота однородной атмосферы. Высота  $r_0$  в (1) была определена, исходя из качественных оценок результатов моделирования диссипации АГВ от приземного источника [13]. Амплитудный множитель  $A$  подбирался таким образом, чтобы величина максимального нагрева термосферы на высоте  $r_0$  составляла 100 К, и в настоящей работе его величина была равна 20 К/мин. В уравнениях ГСМ ТИП учтено также, что возмущение плотности, обусловленное таким крупномасштабным нагревом, может быть учтено согласно поляризационным соотношениям, приведенным в [18]:

$$\frac{\Delta T_d}{T} = -\frac{\Delta \rho_d}{\rho}, \quad (2)$$

где  $\Delta T_d$  и  $\Delta \rho_d$  – добавки к температуре и плотности, соответственно;  $T$  и  $\rho$  – их фоновые значения.

Были проведены расчеты, моделирующие суточную динамику невозмущенной атмосферы, а также воздействие дополнительно источника нагрева, имитирующего эффект диссипации АГВ на верхнюю атмосферу. Источник был задан в точке с координатами  $45^\circ$  с.ш.,  $15^\circ$  в.д. Начальные усло-

вия были заданы таким образом, чтобы состояние атмосферы соответствовало концу декабря.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

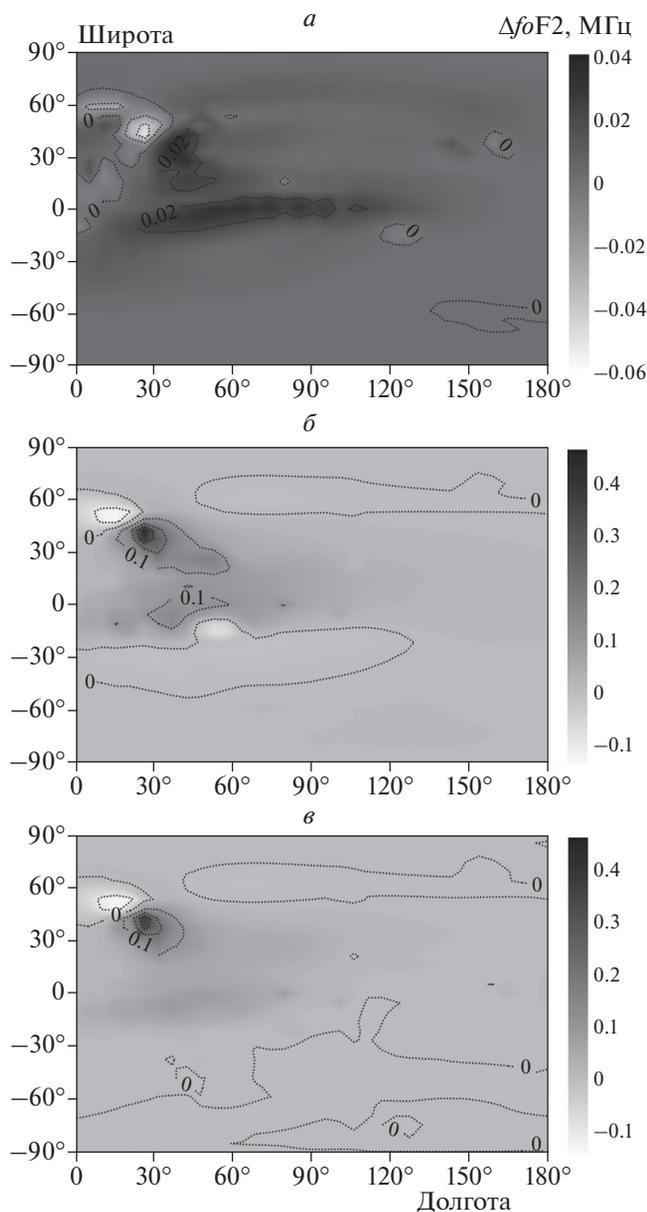
Моделирование охватывало суточный интервал, начиная с полуночи по UT. Было поставлено два типа численных экспериментов: с ночным источником нагрева, включающимся в полночь, и с дневным, включающимся в 10 UT. В обоих случаях источник продолжал работу до конца суток. Реакция ионосферных параметров в обоих случаях отмечалась уже через час после включения источника и достигала максимума в 16 UT.

На рис. 1 представлены широтно-долготные распределения возмущений  $f_oF_2$ . Результаты расчетов показывают, что при включении дополнительного источника в полночь (рис. 1а) возмущения критической частоты невелики, а их пространственная структура достаточно сложна и охватывает значительную часть северного полушария. Непосредственно над источником наблюдается понижение  $f_oF_2$ , в то время как в экваториальной области, напротив, имеет место повышение этого параметра, добавка к которому имеет периодическую структуру. За весь ночной период величины добавки к  $f_oF_2$  не превышают 0.1 МГц и не оказывают существенного влияния на состояние ионосферы.

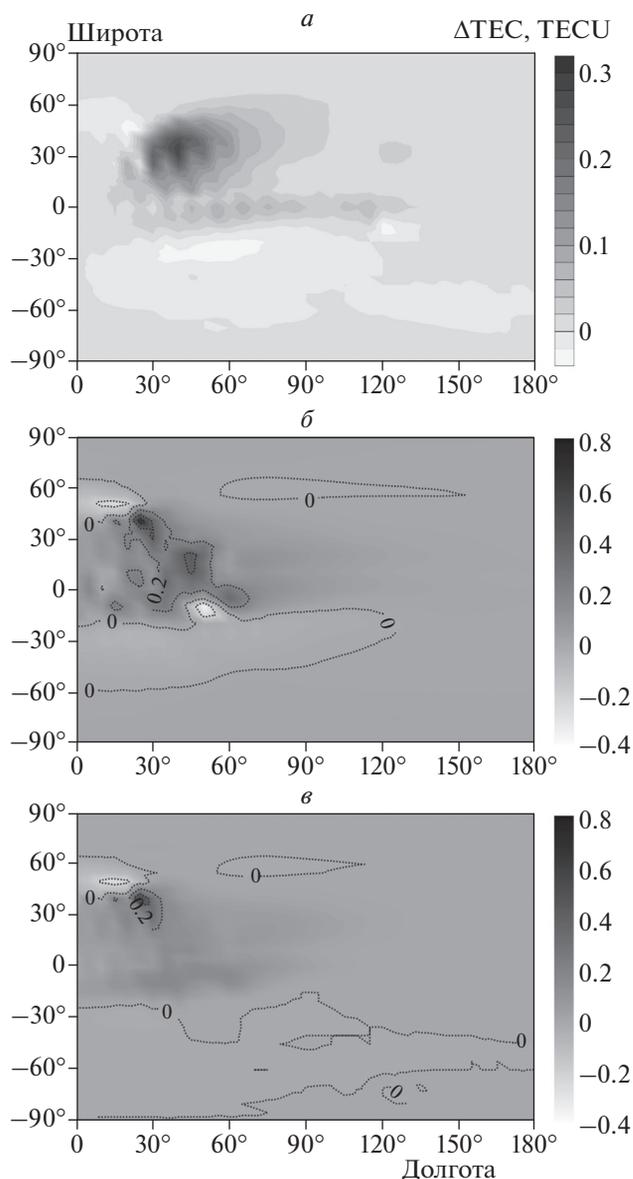
В дневное время суток (рис. 1б) эффект от работы источника усиливается как на экваторе, где добавка достигает 0.15 МГц, так и в области южнее источника, где формируется явно выраженный максимум со значением около 0.4 МГц. К северо-западу от максимума теплового источника отмечается вытянутая на  $20^\circ$  на запад область снижения критической частоты на  $\sim 0.1$ – $0.15$  МГц. Следует отметить, что для дневного источника, начавшего работу в 10 UT, пространственная структура возмущения критической частоты аналогична возмущениям, вызванным работой ночного источника (рис. 1в).

На рис. 2 представлены пространственные возмущения ТЕС. В ночное время (рис. 2а) они имеют выраженный максимум к юго-востоку от источника. Несмотря на то, что абсолютное значение среднеширотного возмущения ТЕС невелико, относительные отклонения от фонового значения существенно превосходят таковые для  $f_oF_2$ : в ТЕС они достигают 8%, в то время как в  $f_oF_2$  – составляют около 1.5%.

Структура возмущений ТЕС в дневное время (рис. 2б, 2в) в целом повторяет структуру возмущений  $f_oF_2$  как для ночного, так и для дневного источников. Следует отметить возникновение локального максимума в низких широтах северного полушария и зонально-симметричного ему локального минимума в южном полушарии, про-



**Рис. 1.** Распределение добавки к  $f_oF2$  в МГц в 6 (а) и 16 UT (б) для ночного источника и в 16 UT (е) для дневного источника.



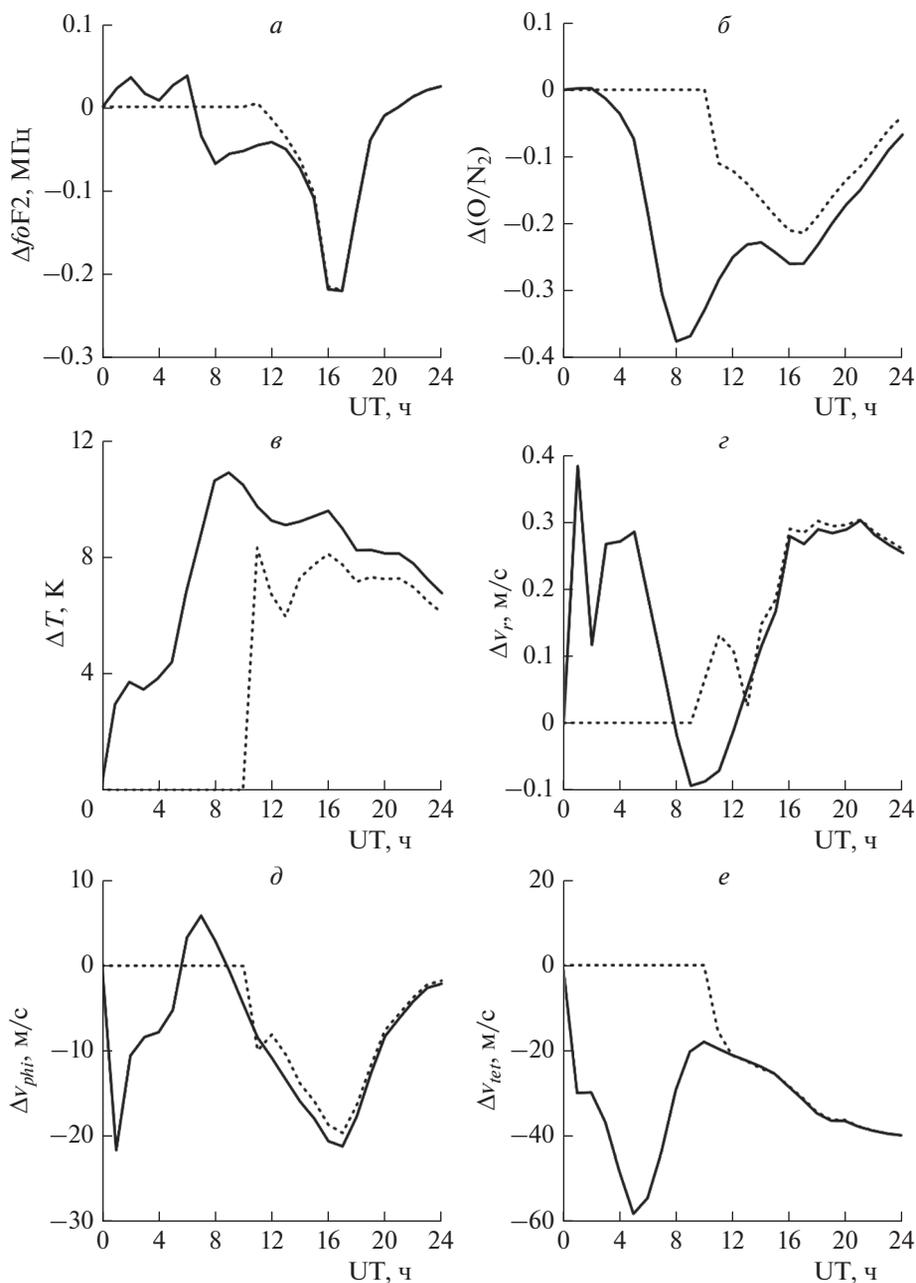
**Рис. 2.** Распределение добавки к ТЕС (в TECU) в 6 (а) и 16 UT (б) для ночного источника и в 16 UT (е) для дневного источника.

являющееся в результатах расчета для ночного источника (рис. 2б).

Как в  $f_oF2$ , так и в ТЕС обращает на себя внимание малая разница между дневными ионосферными эффектами для ночного и дневного источников. Вертикальные профили добавок к динамическим параметрам атмосферы в точке максимального отрицательного эффекта  $f_oF2$ , сдвинутой на пять градусов на север и пять градусов на запад от точки максимального нагрева термосферы, приведены на рис. 3.

Несмотря на то, что существенный рост температуры, изменения отношения  $O/N_2$  и компонент скорости отмечаются уже через несколько часов после начала расчета ночного источника (рис. 3б–3е); существенных колебаний  $f_oF2$  это не вызывает (рис. 3а). В то же время, начиная с 12 UT, отклонения всех ключевых параметров в обоих случаях имеют близкую динамику, порождая схожие эффекты в  $f_oF2$ .

Кроме того, к концу расчета некоторые параметры, такие как добавки к температуре (рис. 3е), отношению концентраций атомарного кислоро-



**Рис. 3.** Графики зависимости добавок к  $f_0F_2$  (а), отношению концентрации атомарного кислорода к концентрации молекулярного азота (б), температуре (в), вертикальной  $-v_z$  (г), меридиональной  $-v_{phi}$  (д) и зональной  $-v_{zet}$  (е) скоростям для расчетов с источником, работающим с 0 UT (сплошная линия) и 10 UT (штриховая линия) на высоте максимума источника нагрева – 180 км в области максимальных отрицательных ионосферных эффектов к северо-западу от источника.

да к концентрации молекулярного азота (рис. 3б) и меридиональной скорости (рис. 3д) снижаются. Такое поведение рассматриваемых параметров может быть связано с тем, что в ночных условиях влияние дополнительного источника нагрева термосферы на ионосферу весьма незначительно и, следовательно, возмущения критических частот в обоих вариантах расчетов дают схожую пространственную структуру возмущений.

Практически одинаковая динамика изменений термосферных параметров в обоих вариантах расчетов в дневное время, по-видимому, связана с сильной локализацией источника возмущений. В связи с этим существенные возмущения термосферы возникают вблизи области источника, а в области максимума отрицательного ионосферного возмущения (северо-западнее термосферного источника) динамика изменения термосферы в

условиях работы как ночного, так и дневного источников, одинакова.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Моделирование ионосферных эффектов от нагрева термосферы, вызванного диссипацией АГВ, демонстрирует снижение электронной концентрации в максимуме F-слоя дневной ионосферы к северо-западу от области источника и ее повышение к югу и юго-востоку от него. Возникающие возмущения быстро распространяются на большие расстояния, достигая экваториальной области.

Ночные ионосферные эффекты возмущений термосферы существенно слабее дневных, несмотря на сопоставимые возмущения основных динамических параметров. Это может быть связано с тем, что локальные возмущения термосферы в ночное время слабо влияют на ионосферу.

В экспериментальных исследованиях показано, что возмущения ионосферы, вызываемые штормами, значительно превосходят возмущения, проявляющиеся в результатах расчетов. Так, в наблюдениях понижения ТЕС могут достигать 50% по отношению к метеоспокойным условиям. В численных расчетах понижение этого параметра не превышало 10%. Можно предположить, что включение только температурного источника возмущения термосферы вследствие диссипации АГВ не является адекватным и требуется более сложное представление об источнике возмущения термосферы, включающее учет ветровых возмущений.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантами Российского фонда фундаментальных исследований № 18-05-00184 А (Карпов И.В.) и № 17-05-00574 А (Борчевкина О.П.), а также грантом Российского научного фонда № 17-17-01060 (Васильев П.А.).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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>
2. Li W., Yue J., Yang Y. et al. // Ibid. 2017. V. 161. P. 43; <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.06.012>
3. Martinis C.R., Manzano J.R. // Ann. Geofisica. 1999. V. 42. № 1. P. 1.
4. Yigit E., Knizova P. K., Georgieva K. et al. // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2016. V. 141. P. 1; <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2016.02.011>
5. Сулова О.П., Карпов И.В., Радиевский А.В. // Хим. физика. 2013. Т. 32. № 9. С. 77; <https://doi.org/10.7868/S0207401X13090124>
6. Борчевкина О.П., Карпов И.В. // Геомагнетизм и аэронавигация. 2017. Т. 57. № 5. С. 670; <https://doi.org/10.7868/S0016794017040046>
7. Карпов И.В., Борчевкина О.П., Дадашев Р.З. и др. // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2. № 2. С. 64; <https://doi.org/10.12737/21001>
8. Карпов И.В., Кшевцевский С.П., Борчевкина О.П. и др. // Хим. физика. 2016. Т. 35. № 1. С. 59; doi: 10.7868/S0207401X16010064
9. Hickey M.P., Walterscheid R.L., Schubert G. // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. A12326; <https://doi.org/10.1029/2011JA016792>
10. Schubert G., Hickey M.P., Walterscheid R.L. // Ibid. 2005. V. 110. D07106; <https://doi.org/10.1029/2004JD005488>
11. Карпов И.В., Кшевцевский С.П. // Геомагнетизм и аэронавигация. 2014. № 4. С. 217; <https://doi.org/10.7868/S001679401404018X>
12. Vadas S.L., Liu H. // J. Geophys. Res. 2009. V. 114. № A10. P. 310; <https://doi.org/10.1029/2009JA014108>
13. Karpov I.V., Kshevetskii S.P. // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2017. V. 164. P. 89; <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.07.019>
14. Намгаладзе А.А., Кореньков Ю.Н., Клименко В.В. и др. // Геомагнетизм и аэронавигация. 1990. Т. 30. № 4. С. 612.
15. Клименко М.В., Клименко В.В., Кореньков Ю.Н. и др. // Космич. исслед. 2013. Т. 51. № 1. С. 62; <https://doi.org/10.7868/S0023420613010056>
16. Карпов И.В., Бессараб Ф.С., Кореньков Ю.Н. и др. // Хим. физика. 2016. V. 35. P. 49; <https://doi.org/10.7868/S0207401X16010052>
17. Карпов И.В., Бессараб Ф.С., Борчевкина О.П. и др. // Геомагнетизм и аэронавигация. 2018. Т. 58. № 4. С. 526; <https://doi.org/10.1134/S0016794018040089>
18. Григорьев Г.И. // Изв. вузов. Радиофизика. 1999. Т. 42. № 1. С. 3.