

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ИОНОСФЕРЫ ОТ ЛОКАЛЬНЫХ ТРОПОСФЕРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

### NUMERICAL MODELING OF SPATIAL PERTURBATIONS OF THE IONOSPHERE FROM LOCAL TROPOSPHERIC SOURCES

**И.В. Карпов** 

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

**Ф.С. Бессараб** 

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

**О.П. Борчевкина** 

Калининградский филиал Института земного магнетизма,  
ионосферы и распространения радиоволн  
им. Н.В. Пушкова РАН,  
Калининград, Россия, olga.borchevkina@mail.ru

**I.V. Karpov**

West Department of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism,  
Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS,  
Kalininograd, Russia, ivkarpov@inbox.ru

**F.S. Bessarab**

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

**O.P. Borchevkina**

West Department of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism,  
Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS,  
Kalininograd, Russia, olga.borchevkina@mail.ru

**Аннотация.** В работе представлены результаты моделирования пространственно-временных возмущений термосферы во время сильного метеорологического возмущения. Моделирование выполнено с использованием Глобальной самосогласованной модели термосферы, ионосферы и протоносферы (ГСМ ТИП). Воздействие тропосферных/стратосферных источников на термосферу при диссипации акустических и внутренних гравитационных волн, генерируемых в области метеорологического шторма, учитывалось в ГСМ ТИП путем задания дополнительного теплового источника на высоте 120 км. Результаты моделирования эффектов циклона в октябре 2017 г. показали, что действие локального дополнительного источника нагрева термосферы приводит к возмущениям параметров термосферы и ионосферы как непосредственно над областью источника, так и на значительном удалении от него. В области дополнительного нагрева отмечается понижение полного электронного содержания ( $TEC$ ), достигающее в дневное время 20 % по сравнению с метеорологически спокойным днем. Южнее и восточнее области локализации источника отмечаются положительные возмущения  $TEC$  с относительными амплитудами 5–10 % в дневное время. Физические процессы, определяющие реакцию ионосферы непосредственно в области источника, обусловлены нагревом термосферы и его влиянием на изменения нейтрального состава и циркуляции нейтрального ветра. Возмущения  $TEC$  в областях, удаленных от области источника, определяются динамическими процессами, которые приводят к переносу плазмы в восточном направлении и смещению ионосферных возмущений к низким широтам.

**Ключевые слова:** полное электронное содержание, термосфера, ионосфера, акустические волны, внутренние гравитационные волны, численное моделирование, метеорологический шторм.

**Abstract.** The paper presents the results of modeling of spatial and temporal perturbations of the thermosphere during a strong meteorological disturbance. The modeling was performed using the Global Self-Consistent Model of the thermosphere, ionosphere, and protonosphere (GSM TIP). The impact of tropospheric/stratospheric sources on the thermosphere during dissipation of acoustic and internal gravity waves, generated in the meteorological storm region, was considered in GSM TIP by specifying an additional thermal source. The results of modeling of ionospheric effects of the meteorological storm in October 2017 have shown that the action of a local additional source of heating of the thermosphere leads to perturbations of the thermosphere and ionosphere parameters both directly above the source region and at a significant distance from it. In additional heating of the thermosphere, a decrease is observed in the total electron content ( $TEC$ ) values, reaching 20 % in the daytime compared to a meteorologically quiet day. To the south and east of the source region, there are positive  $TEC$  perturbations with relative amplitudes 5–10 % during the daytime. The physical processes determining the ionospheric response directly in the source region are conditioned by heating of the thermosphere and its influence on changes in the neutral composition and circulation of the neutral wind. The  $TEC$  perturbations in the regions remote from the source region are determined by dynamic processes, which lead to the eastward transport of plasma and displacement of ionospheric perturbations to low latitudes.

**Keywords:** total electron content, thermosphere, ionosphere, acoustic waves, internal gravity waves, numerical modeling, meteorological storm.

## ВВЕДЕНИЕ

Солнечная и геомагнитная активность являются основными факторами, влияющими на состояние ионосферы, однако даже при постоянстве этих факторов межсуточная изменчивость параметров ионосферы может достигать 20 % [Lay, 2018; Pedatella, Liu, 2018]. Такая изменчивость обычно связывается с процессами в нижних слоях атмосферы, в частности, с сильными метеорологическими возмущениями в тропосфере, например штормами и тайфунами [Chernigovskaya et al., 2015; Šindelárova et al., 2009; Hickey et al., 2001; Koucká Knížová et al., 2023; Bishop et al., 2006; Li et al., 2017; Wang et al., 2018]. Из-за высокой частоты возникновения метеорологических возмущений, их различных пространственных и временных масштабов, а также сложного характера распространения из тропосферы в верхнюю атмосферу часто трудно установить, с какими именно возмущениями в нижней атмосфере связаны те или иные проявления межсуточной изменчивости ионосферы. Влияние метеорологических возмущений на ионосферу зависит от их параметров, местного времени, сезона и других факторов. К настоящему времени физические механизмы этих процессов изучены недостаточно, что делает актуальным дальнейшее исследование реакции ионосферы на метеорологические возмущения.

Особый интерес представляет изучение механизмов формирования ионосферных неоднородностей, а также взаимосвязи процессов в нижней атмосфере с пространственными и временными проявлениями возмущений в ионосфере. Основной причиной таких возмущений ионосферы считается генерация и распространение атмосферных волн различных масштабов: приливных, планетарных, акустико-гравитационных (см., например, [Wang et al., 2018; Koval et al., 2022]). Вертикальное взаимодействие в атмосфере при участии планетарных волн изучалось в работах [Pancheva et al., 2013; Pedatella, Forbes, 2009]. Особая роль в осуществлении вертикального взаимодействия атмосферных слоев принадлежит акустическим (AB) и внутренним гравитационным волнам (ВГВ). Эти волны распространяются из нижней атмосферы в верхнюю, где их диссипация приводит к возмущениям термосферы и ионосферы [Hickey et al., 2001; Yiğit, Medvedev, 2015]. Экспериментальные и теоретические исследования подтверждают важность роли AB и ВГВ в передаче энергии из тропосферы в ионосферу [Artru et al., 2005; Hickey et al., 2011; Карпов и др., 2016; Koucká Knížová et al., 2020]. Однако для полного понимания этих процессов необходимо дальнейшее изучение физических механизмов формирования и динамики ионосферных неоднородностей, возникающих вследствие тропосферных возмущений.

В данной работе представлены результаты численного моделирования пространственно-временных возмущений термосферы и ионосферы, вызванных воздействием локализованного источника тепла в термосфере. Этот источник имитирует нагрев, возникающий при диссипации AB и ВГВ, генерируемых в области метеорологического шторма.

## 1. МОДЕЛЬ ГСМ ТИП И ПОСТАНОВКА ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Численные эксперименты были выполнены с применением Глобальной самосогласованной модели термосферы, ионосферы и протоионосферы Земли (ГСМ ТИП). Эта физическая модель, основанная на конечно-разностном решении системы квазигидродинамических уравнений для многокомпонентной плазмы, позволяет исследовать ключевые параметры околосолнечной среды — электронную концентрацию, температуру и состав ионов и нейтральных газов, а также их изменения под влиянием солнечной активности, геомагнитных бурь и искусственных воздействий.

ГСМ ТИП учитывает взаимодействие заряженных частиц (ионов и электронов) с нейтральными газами, а также влияние электрических полей магнитосферного и динамо-происхождения. В модели рассчитываются следующие параметры околосолнечной среды: электронная концентрация, концентрации ионов ( $O^+$ ,  $H^+$ ,  $NO^+$ ,  $O_2^+$ ,  $N_2^+$ ); электронная и ионная температуры; компоненты вектора ионной скорости; электрические поля магнитосферного и динамо-происхождения; концентрации основных компонент нейтрального состава ( $O_2$ ,  $N_2$ ,  $O$ ) и нечетного азота ( $NO$ ,  $N(^2D)$ ,  $N(^4S)$ ); температура нейтрального газа; компоненты вектора среднемассовой скорости. Подробное описание ГСМ ТИП приведено в работах [Namgaladze et al., 1991; Korenkov et al., 1996; Бессараб, Кореньков, 1998; Клименко и др., 2006].

Модель используется для изучения суточных, сезонных и солнечно-циклических вариаций параметров верхней атмосферы, а также влияния геомагнитных возмущений на ионосферу и термосферу [Клименко et al., 2011; Клименко и др., 2016; Ясюкевич и др., 2018].

Представленные в работе численные эксперименты проводились для геомагнитно-спокойных условий 28–30 октября 2017 г., когда над Европейским континентом проходил мощный циклон. На рис. 1 представлены карты приземного давления в области прохождения шторма по данным реанализа ERA5 [Hersbach et al., 2020]. Видно, что центр циклона (минимум давления) формируется над Средиземным морем. Циклон медленно перемещается на северо-восток, достигает своего максимального развития над Центральной Европой 29–30 октября и разрушается над Северной Европой к полуночи 31 октября. Максимальные порывы ветра в Калининградской области достигали 27 м/с во второй половине 29 октября – первой половине 30 октября, что позволяет отнести данное метеорологическое возмущение к сильным — 8–9 баллов по шкале Бофорта.

В ГСМ ТИП нижняя граница находится на высоте 80 км, так что исследование ионосферных эффектов от явлений, происходящих в нижележащих слоях атмосферы, *in situ* невозможно. Корректно учитывать возмущения, приходящие из тропосферы и стратосферы, путем задания соответствующих граничных условий высоте 80 км не удается из-за отсутствия в крупномасштабной гидростатической модели ГСМ

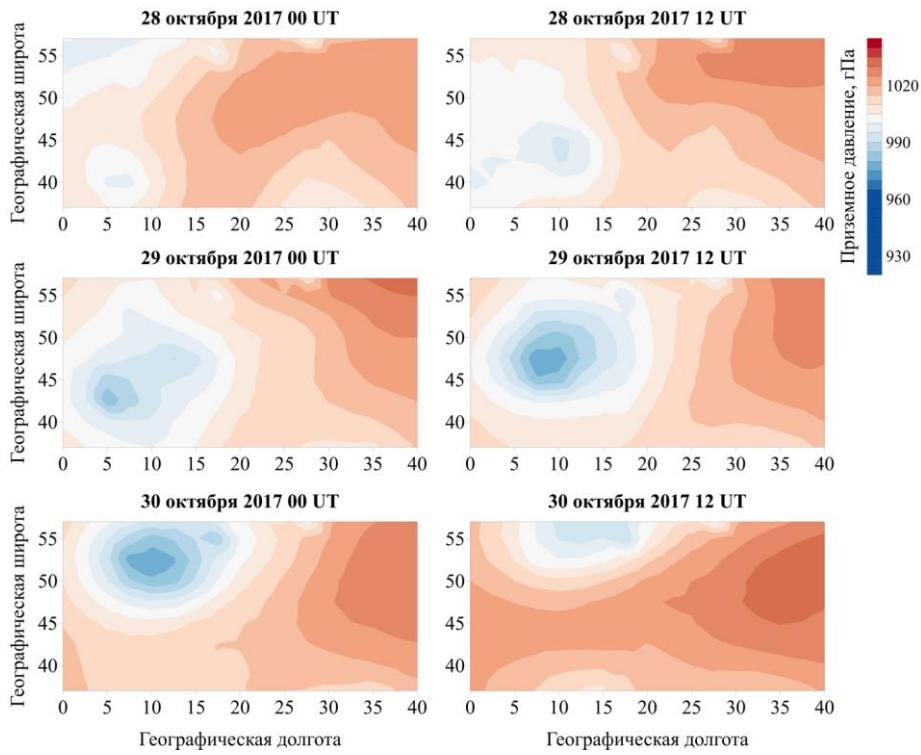


Рис. 1. Приземное давление в области прохождения шторма в различные моменты времени 28–30 октября 2017 г.

ТИП быстрых волновых процессов. Полагая, что в реальной термосфере распространяющиеся снизу короткие ВГВ диссилируют в области высот  $\sim 120$ –150 км, результат воздействия в ГСМ ТИП тропосферных/стратосферных источников в термосфере можно учесть путем задания теплового источника на высоте предполагаемого максимума диссилиации [Карпов и др., 2020]. Для этого в варианте расчета с тепловым источником на каждом шаге по времени к рассчитанному значению температуры добавляется возмущение температуры ( $\Delta T$ ). В некоторых случаях метеорологическое возмущение может иметь сложную пространственную структуру, которую можно смоделировать суперпозицией источников, описываемой выражением вида

$$\sum_{i=1}^N A_i Q_i(\theta, \varphi, t) S_i(h).$$

Здесь  $N$  — число задаваемых источников;  $A_i$  — амплитуда  $i$ -го теплового возмущения, подобранная таким образом, чтобы интегральное действие источника за время его существования (включения) достигло требуемого теплового эффекта;  $Q_i(\theta, \varphi, t)$  — широтно-долготное распределение  $i$ -го источника;  $S_i(h)$  — его высотное распределение, которое рас-

считывается по формуле  $\exp\left(-\frac{(h-h_{0i})^2}{\Delta h_i^2}\right)$ . Значения

$h_{0i}$  и  $\Delta h_i$  составляли 120 км и 20 км соответственно. В данной работе тепловой эффект метеорологического возмущения 28–30 октября моделировался тремя источниками с одинаковой амплитудой и зависимостью от высоты. Положение источников в узлах сетки модели и количество одновременно действующих источников задавались таким образом, чтобы

их суперпозиция приблизительно повторяла географическое положение и перемещение метеорологического шторма (см. рис. 1). Время включения источников — 18 UT 28 октября, а время окончания их действия — полночь 30 октября. Нормированная амплитуда источников 1.2 К/мин была подобрана таким образом, чтобы максимальный температурный эффект достигал около 100 К на высоте 300 км.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Входными параметрами ГСМ ТИП являются индексы геомагнитной и солнечной активности. В представленных численных экспериментах указанные индексы не изменялись, следовательно, полученные в расчетах возмущения обусловлены только дополнительными тепловыми источниками, моделирующими результат диссилиации ВГВ в термосфере. Были проведены расчеты ГСМ ТИП для условий 28–30 октября 2017 г. с включением дополнительного источника тепла (вариант 1 — В1) и без него (вариант 2 — В2). Для выделения эффектов, обусловленных дополнительным источником тепла в термосфере, рассматривались возмущения параметров термосфера и ионосфера, которые рассчитывались как разность между их значениями в варианте 1 и варианте 2:

$$\begin{aligned} \text{del}(n_p, r, \theta, \varphi, t) = \\ = \text{Rez1}(n_p, r, \theta, \varphi, t) - \text{Rez2}(n_p, r, \theta, \varphi, t), \end{aligned}$$

где  $n_p$  — номер параметра;  $r$  — высота;  $\theta$  и  $\varphi$  — широта и долгота;  $t$  — время;  $\text{Rez1}(n_p, r, \theta, \varphi, t)$  и  $\text{Rez2}(n_p, r, \theta, \varphi, t)$  — массивы результатов расчетов по вариантам 1 и 2.

На рис. 2 приведена картина изменения относительного возмущения температуры

$$(T_n(B1) - T_n(B2)) / T_n(B2)$$

со временем для точки с координатами  $40^{\circ}$  N,  $10^{\circ}$  E. Хорошо видны время включения нагрева и образование локального повышения температуры на высоте 120 км, где расположен максимум источника, а также области пониженных значений  $T_n$  на высоте 135–140 км. Временные вариации мощности источника порождают динамические процессы, которые начинают влиять на всю термосферу над источником, нагревая нейтральный газ выше 140 км. Поскольку теплоемкость нейтрального газа с высотой сильно уменьшается, то относительно небольшой нагрев на 120 км приводит к значительному повышению температуры в верхней термосфере, которое сохраняется после окончания действия циклона в тропосфере.

Распространение возмущения температуры во время метеорологического возмущения на высоте 200 км в Северном полушарии показано на рис. 3. Начало работы источника, изменение его амплитуды и пространственной конфигурации порождают волноподобное распространение тепла от эпицентра циклона к высоким и низким широтам. Температурный эффект, незначительный 28 октября — около  $\pm 10$  K, через сутки, 29 октября, усиливается. Область максимального нагрева охватывает большую часть Северного полушария и перемещается сначала от эпицентра к высоким широтам, а затем к низким. Область разогрева увеличивается 30 октября, процесс переноса тепла в высокие широты и обратно повторяется, а  $\Delta T_n$  превышает 50 K. В расчетах тепловой источник имеет нестационарный характер, и генерируемое им возмущение температуры на высоте 200 км носит знакопеременный характер, а положительный эффект начинает доминировать после полудня 29 октября (см. рис. 3).

Значительное повышение температуры в F2-области приводит к возмущению ионосферных параметров. Исследование изменений полного электронного содержания ( $TEC$ ) во время различных гелиогеофизических событий является широко используемым и доступным инструментом для мониторинга ионосферы [Захаров, Куницын, 2012; Astafyeva, 2019; Rahmani et al., 2020]. Нелокальный характер возмущения ионосферы хорошо иллюстрируется временными вариациями возмущения модельного полного электронного содержания ( $\Delta TEC$ ) на долготах  $5^{\circ}$  и  $50^{\circ}$  E (рис. 4). Напомним, что возмущение параметров рассчитывалось как разность между значениями в двух вариантах расчетов — с учетом и без учета дополнительного источника. Видно, что амплитуда возмущения возрастает в дневные и убывает в ночные часы, при этом преобладают отрицательные возмущения, которые достигают  $-5$  TECU 30 октября на долготе  $5^{\circ}$  E. На долготе  $50^{\circ}$  E наблюдаются меньшие по амплитуде вариации  $\Delta TEC$ , которые также усиливаются 30 октября, достигая  $-3$  TECU. Кроме отрицательного возмущения, в вариациях  $\Delta TEC$  присутствуют небольшие положительные возмущения в экваториальных широтах.

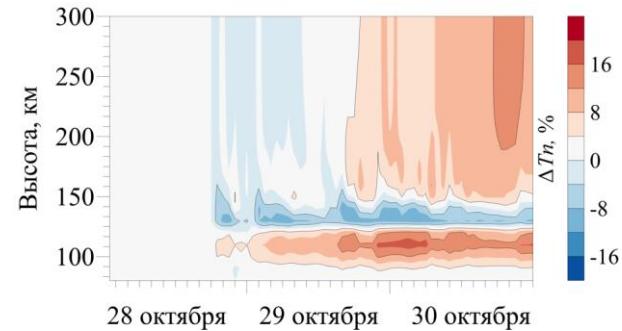


Рис. 2. Изменение относительного возмущения температуры  $(T_n(B1) - T_n(B2)) / T_n(B2)$  в плоскости время–высота для точки с координатами  $40^{\circ}$  N,  $10^{\circ}$  E

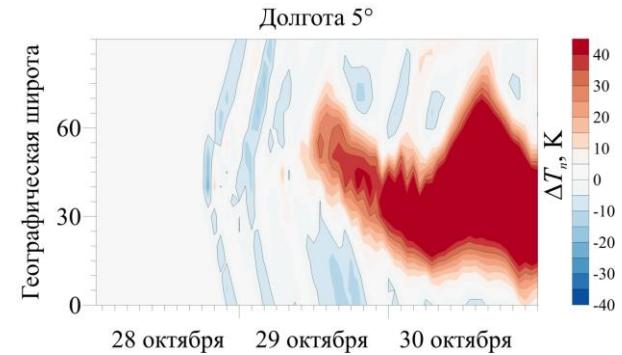


Рис. 3. Изменение возмущения температуры  $\Delta T_n$  28–30 октября 2017 г. на высоте 200 км на долготе  $5^{\circ}$  E в Северном полушарии

На рис. 5 приведены значения  $\Delta TEC$  в Северном полушарии, построенные для 29 и 30 октября в 12:00 UTC. Видно, что возмущения  $TEC$  проявляются как в области дополнительного теплового источника, так и на значительном удалении от него. Отрицательные возмущения  $TEC$  распространяются главным образом в южном направлении, а на юго-востоке от эпицентра формируется область небольшого повышения  $TEC$ . Амплитуда возмущения составляет около 2 и 5 TECU в дневные часы 29 и 30 октября соответственно. Значения  $\Delta TEC$  в ночные часы пре-небрежимо малы и здесь не приводятся.

Рассчитанные карты вариаций  $\Delta TEC$  можно сопоставить с возмущениями  $TEC$ , полученными из глобальных карт полного электронного содержания, построенных по данным навигационных спутниковых систем. На рис. 6 приведены возмущения  $\Delta TEC$ , построенные по картам CODE (Center of Orbit Determination in Europe) [Schaer, 1999]. Фоновые невозмущенные значения  $TEC$  формировались как средние значения за 8 дней до развития циклона — с 20 по 27 октября. Наибольшими значениями  $\Delta TEC$  характеризовалось 30 октября (рис. 6). Выше  $30^{\circ}$  N хорошо видна область отрицательных значений  $\Delta TEC \sim -4$  TECU, которая сформировалась приблизительно над центром рассматриваемого циклона. Как и в модельных расчетах (см. рис. 5), возмущение  $TEC$  смещено по долготе на  $10^{\circ}$ – $20^{\circ}$  на запад относительно локализации источника. Заметим, что значительное уменьшение  $\Delta TEC$  в низких широтах и на экваторе вызвано, вероятно, сложностью воспроизведения структуры экваториальной аномалии на картах  $TEC$ .

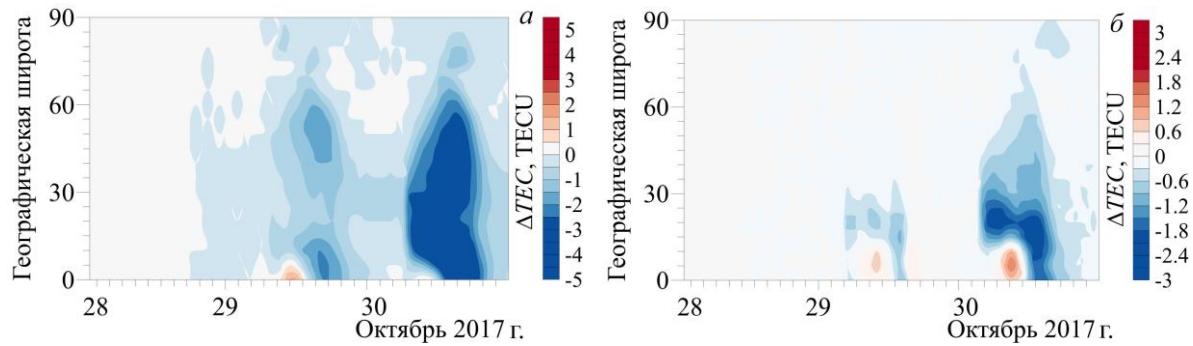
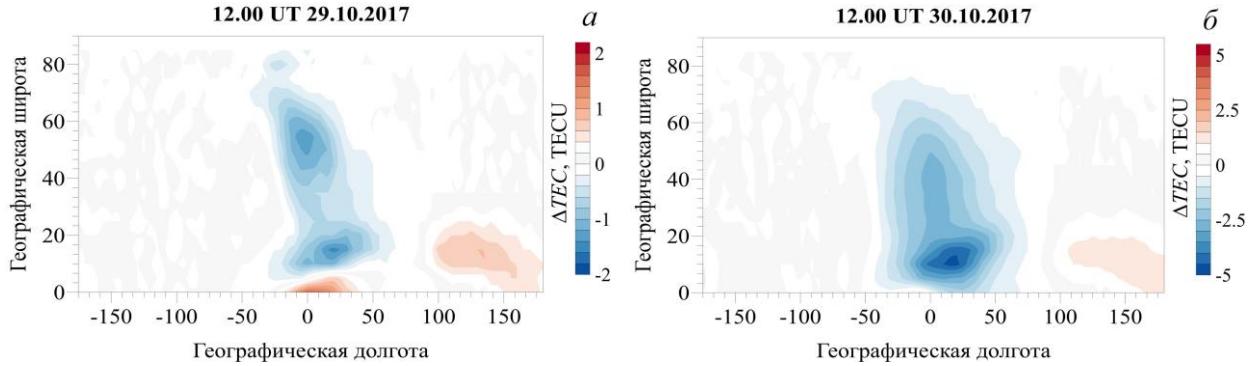
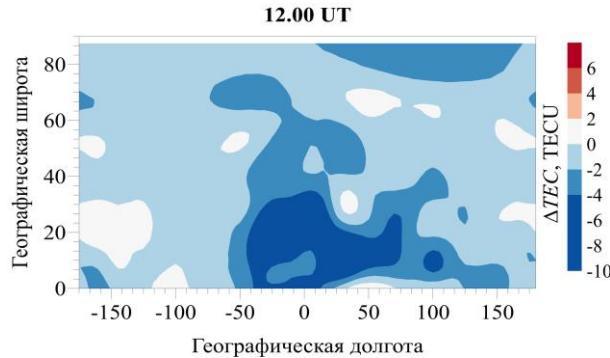
Рис. 4. Вариации модельного  $\Delta\text{TEC}$  на долготе  $5^\circ\text{E}$  (а) и  $50^\circ\text{E}$  (б) в Северном полушарииРис. 5. Распределения возмущений  $\Delta\text{TEC}$  в Северном полушарии в 12:00 UT 29 (а) и 30 (б) октября 2017 г.

Рис. 6. Возмущения полного электронного содержания в Северном полушарии в 12:00 UT 30 октября 2017 г., построенные по картам CODE

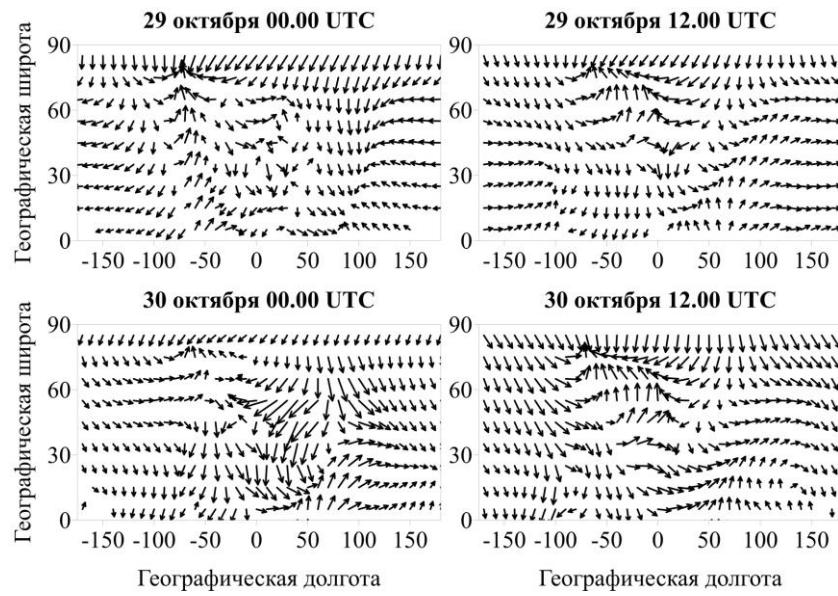
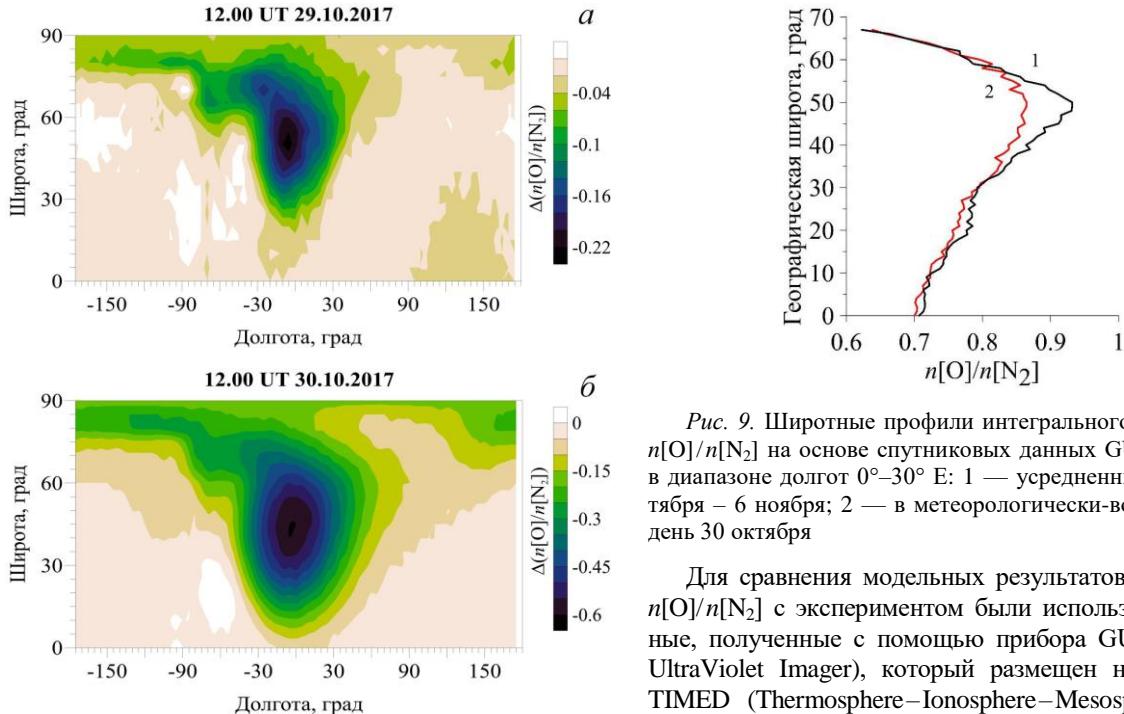
### 3. ОБСУЖДЕНИЕ

Ионосферные возмущения, очевидно, обусловлены включением дополнительного источника тепла в термосфере, что имитирует эффект распространения и диссипации волн, приходящих из нижней атмосферы. Появление областей повышенной температуры влияет на ионизационно-рекомбинационные процессы и приводит к снижению электронной концентрации. Физические процессы, развивающиеся под действием локальных тепловых источников в термосфере, и их влияние на ионосферу подробно рассматривались в работах [Hickey et al., 2001; Карпов, Васильев, 2020; Gavrilov et al., 2020; Kurdyayeva et al., 2024]. Локальный разогрев нейтрального газа приводит к соответствующему повышению давления и усиление антициклической динамики. На рис. 7 представлены распределения возмущений горизонтальных компонент термосферного ветра в Северном

полушарии на высоте 250 км для различных моментов времени 29 и 30 октября.

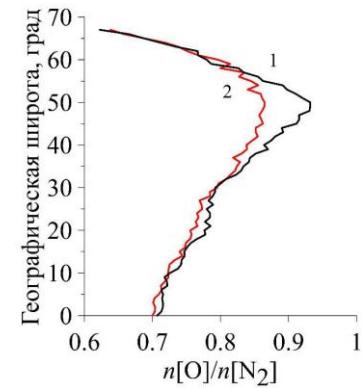
Видно, что непосредственно над областью теплового источника в первые часы его работы возмущения ветра носят неупорядоченный характер. При дальнейшей работе источника в дневных условиях возникают вихревые структуры. Так, западнее области источника ( $0^\circ$ – $100^\circ\text{W}$ ) отмечается антициклическое возмущение, а на долготах  $0^\circ$ – $50^\circ\text{E}$  севернее источника возмущение носит циклонический характер. В ночных условиях на долготах от  $-50^\circ\text{W}$  до  $50^\circ\text{E}$  возмущение ветра направлено к экватору. Можно отметить также, что при работе источника со временем формируется направленный на восток зональный поток. В целом возмущение ветра определяется двумя основными процессами, обусловленными градиентами давления и силой Кориолиса. В дневных условиях преобладающим фактором является сила Кориолиса, что приводит к развитию вихревых структур. В ночных условиях усиливается влияние изменений давления, что приводит к распространению возмущений к нижним широтам в долготном секторе, определяемом пространственными масштабами области возмущения. Возмущение циркуляции носит сложный характер. В данном случае ветровой механизм не играет определяющей роли в формировании отрицательного возмущения, поскольку не формируется преобладающих направлений скорости ветра, прежде всего меридионального.

Известно, что на развитие ионосферных возмущений на высотах F-области влияют процессы меридионального переноса и изменения нейтрального состава, главным образом отношения концентраций атомарного кислорода и молекулярного азота

Рис. 7. Возмущение вектора горизонтальной скорости нейтрального газа  $\Delta V$  на высоте 250 км 29–30 октября 2017 г.Рис. 8. Изменение отношения  $n[O]/n[N_2]$  на высоте 200 км в 12:00 UT 29 (а) и 30 (б) октября 2017 г.

$n[O]/n[N_2]$ . Тепловой нагрев в термосфере приводит к уменьшению значений  $n[O]/n[N_2]$  и появлению отрицательных возмущений TEC. Рассмотрим, как изменялось отношение  $n[O]/n[N_2]$  в наших расчетах.

На рис. 8 приведены распределения  $\Delta(n[O]/n[N_2])$  на высоте 200 км для 12:00 UT 29 и 30 октября 2017 г. Хорошо видно, что вследствие нагрева нейтрального газа величина  $n[O]/n[N_2]$  значительно уменьшается, причем область отрицательных значений  $\Delta(n[O]/n[N_2])$  расширяется и смещается к низким широтам. Заметим, что область понижения  $n[O]/n[N_2]$  не совпадает полностью с областью отрицательных возмущений  $\Delta TEC$ , хотя их положение весьма близко.

Рис. 9. Широтные профили интегрального отношения  $n[O]/n[N_2]$  на основе спутниковых данных GUVI/TIMED в диапазоне долгот  $0^\circ$ – $30^\circ$  Е: 1 — усредненный за 23 октября – 6 ноября; 2 — в метеорологически-возмущенный день 30 октября

Для сравнения модельных результатов изменения  $n[O]/n[N_2]$  с экспериментом были использованы данные, полученные с помощью прибора GUVI (Global UltraViolet Imager), который размещен на спутнике TIMED (Thermosphere–Ionosphere–Mesosphere Energistics and Dynamics) [Strickland et al., 1995]. Данные GUVI позволяют рассчитать отношение интегральных концентраций атомарного кислорода и молекулярного азота в определенном диапазоне высот (как правило, от 130 до 165 км). Использовались данные уровня 3, доступные на сайте [<https://guvitimed.jhuapl.edu>]. Для сравнения с модельными расчетами были отобраны и усреднены за 15 дней (с 23 октября по 6 ноября 2017 г.) данные, соответствующие долготному сектору  $0^\circ$ – $30^\circ$  Е и временному интервалу от 08:00 до 12:00 UTC. На рис. 9 представлены два широтных профиля  $n[O]/n[N_2]$  по данным TIMED/GUVI — для метеорологически-возмущенного дня 30 октября и усредненный за 23 октября – 6 ноября.

Видно, что на широтах  $35^\circ$ – $55^\circ$  N, которые соответствуют области метеорологического возмущения, 30 октября происходит уменьшение  $n[O]/n[N_2]$

по данным TIMED/GUVI на ~10 % по сравнению с усредненными данными. Заметим, что геомагнитная обстановка в рассматриваемый период была невозмущенной.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Результаты численных экспериментов по моделированию ионосферных эффектов циклона 28–30 октября 2017 г. показали, что локализованный дополнительный источник нагрева термосферы вызывает возмущения параметров среды как непосредственно над областью источника, так и на значительном удалении от него. Физические процессы, определяющие реакцию ионосферы в непосредственной близости от источника, обусловлены нагревом термосферы и его влиянием на динамические процессы, а также на изменения нейтрального состава ионосферы. В области разогрева формируется зона отрицательных ионосферных эффектов. В удаленных от источника регионах изменения вызываются процессами переноса, связанными с изменениями давления и действием силы Кориолиса. Это приводит к перемещению плазмы в восточном направлении и смещению ионосферных аномалий к низким широтам. Влияние этих факторов определяется значительными пространственными масштабами области дополнительного теплового источника и продолжительностью его действия. Следует отметить, что возникающие возмущения циркуляции термосферного ветра не являются основным фактором, определяющим реакцию ионосферы на указанные изменения.

В целом результаты исследований показали следующее:

1. Непосредственно в области дополнительного нагрева термосферы понижение значений  $\Delta TEC$  в дневное время 29 и 30 октября достигает 20 % по сравнению со спокойным днем. В ночные часы возмущения  $TEC$  пренебрежимо малы.

2. Южнее и восточнее области локализации дополнительного источника отмечаются положительные возмущения  $\Delta TEC$  с относительными амплитудами 5–10 % в дневное время. При продолжительном воздействии теплового источника области положительных возмущений смещаются к экваториальным широтам.

3. Возникающие возмущения циркуляции термосферного ветра не являются основным фактором, определяющим реакцию ионосферы на рассмотренные возмущения. Отсюда следует, что важное значение имеет изменение газового состава термосферы. В сравнении с экспериментальными данными наши расчеты демонстрируют уменьшение  $n[O]/n[N_2]$  в 2–2.5 раза по сравнению с данными наблюдений, что и обуславливает значительно большее ионосферное возмущение, чем в наблюдениях. Причиной этого могут быть недостаточные знания о характеристиках источника возмущений термосферы в условиях метеорологических штормов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-27-00213 [<https://rscf.ru/project/25-27-00213/>].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бессараб Ф.С., Коренков Ю.Н. Влияние окиси азота на глобальные распределения термосферных и ионосферных параметров. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1998, т. 38, № 5, с. 131–140.

Захаров В.И., Кунинец В.Е. Региональные особенности атмосферных проявлений тропических циклонов по данным наземных GPS-сетей. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2012, т. 52, № 4, с. 562–574.

Карпов И.В., Васильев П.А. Возмущения ионосферы обусловленные воздействием локализованных термосферных источников. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2020, т. 60, № 4, с. 496–501. DOI: [10.31857/S0016794020040069](https://doi.org/10.31857/S0016794020040069).

Карпов И.В., Кшевецкий С.П., Борчевкина О.П. и др. Возмущения верхней атмосферы и ионосферы, инициированные источниками акустико-гравитационных волн в нижней атмосфере. *Химическая физика*. 2016, т. 35, № 1, с. 59–64. DOI: [10.7868/S0207401X16010064](https://doi.org/10.7868/S0207401X16010064).

Карпов И.В., Борчевкина О.П., Васильев П.А. Моделирование ионосферных эффектов, вызванных прохождением метеорологических штормов. *Химическая физика*. 2020, т. 39, № 4, с. 63–67. DOI: [10.31857/S0207401X20040081](https://doi.org/10.31857/S0207401X20040081).

Клименко М.В., Клименко В.В., Брюханов В.В. Численное моделирование электрического поля и зонального тока в ионосфере земли: динамо-поле и экваториальный электроджет. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2006, т. 46, № 4, с. 485–494.

Клименко М.В., Клименко В.В., Захаренкова И.Е. Долготные вариации ионосферного, плазмосферного и полного электронного содержания в декабре 2009 года. *Химическая физика*. 2016, т. 35, № 1, с. 31–40. DOI: [10.7868/S0207401X1601009X](https://doi.org/10.7868/S0207401X1601009X).

Ясюкевич А.С., Клименко М.В., Куликов Ю.Ю. и др. Изменения параметров средней и верхней атмосферы во время внезапного стратосферного потепления в январе 2013 г. *Солнечно-земная физика*. 2018, т. 4, № 4, с. 62–75. DOI: [10.12737/szf-44201807](https://doi.org/10.12737/szf-44201807) / Yasyukevich A.S., Klimenko M.V., Kulikov Yu.Yu., Klimenko V.V., Bessarab F.S., Korenkov Yu.N., et al. Changes in the middle and upper atmosphere parameters during the January 2013 sudden stratospheric warming. *Sol-Terr. Phys.* 2018, vol. 4, no. 4, pp. 48–58. DOI: [10.12737/stp-44201807](https://doi.org/10.12737/stp-44201807).

Artru J., Ducic V., Kanamori H., et al. Ionospheric detection of gravity waves induced by tsunamis. *Geophysical Journal International*. 2005, vol. 160, iss. 3, pp. 840–848. DOI: [10.1111/j.1365-246X.2005.02552.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2005.02552.x).

Astafyeva E. Ionospheric detection of natural hazards. *Rev. Geophys.* 2019, vol. 57, pp. 1265–1288. DOI: [10.1029/2019RG000668](https://doi.org/10.1029/2019RG000668).

Bishop R.L., Aponte N., Earle G.D., et al. Arecibo observations of ionospheric perturbations associated with the passage of tropical storm Odette. *J. Geophys. Res.* 2006, vol. 111, iss. A11, no. 320, pp. 1–9. DOI: [10.1029/2006JA011668](https://doi.org/10.1029/2006JA011668).

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

Gavrilov N.M., Koval A.V., Kshevetskii S.P. Thermal effects of nonlinear acoustic-gravity waves propagating at thermospheric temperatures matching high and low solar activity. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2020, vol. 208, p. 105381. DOI: [10.1016/j.jastp.2020.105381](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105381).

Hersbach H., Bell B., Berrisford P., et al. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2020, vol. 146, iss. 730, pp. 1999–2049. DOI: [10.1002/qj.3803](https://doi.org/10.1002/qj.3803).

Hickey M.P., Schubert G., Walterscheid R.L. Acoustic wave heating of the thermosphere. *J. Geophys. Res.* 2001, vol. 106, iss. A10, pp. 21543–21548. DOI: [10.1029/2001JA000036](https://doi.org/10.1029/2001JA000036).

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.* 2011, vol. 116, p. A12326. DOI: [10.1029/2011JA016792](https://doi.org/10.1029/2011JA016792).

Klimenko M.V., Klimenko V.V., Zakharenkova I.E. et al. Formation mechanism of great positive TEC disturbances prior to Wenchuan earthquake on May 12, 2008. *Adv. Space Res.* 2011, vol. 48, no. 3, pp. 488–499. DOI: [10.1016/j.asr.2011.03.040](https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.03.040).

Korenkov Yu.N., Bessarab F.S., Klimenko V.V., et al. Numerical modelling of the thermosphere-ionosphere coupling during substorm. *Adv. Space Res.* 1996, vol. 18, no. 3, pp. 41–44. DOI: [10.1016/0273-1177\(95\)00834-2](https://doi.org/10.1016/0273-1177(95)00834-2).

Koucká Knížová P., Podolská K., Potužníková K., et al. Evidence of vertical coupling: Meteorological storm Fabienne on 23 September 2018 and its related effects observed up to the ionosphere. *Ann. Geophys.* 2020, vol. 38, pp. 73–93. DOI: [10.5194/angeo-38-73-2020](https://doi.org/10.5194/angeo-38-73-2020).

Koucká Knížová P., Potužníková K., Podolská K., et al. Multi-instrumental observation of mesoscale tropospheric systems in July 2021 with a potential impact on ionospheric variability in midlatitudes. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences.* 2023, vol. 10, no. 1197157, pp. 1–22. DOI: [10.3389/fspas.2023.1197157](https://doi.org/10.3389/fspas.2023.1197157).

Koval A.V., Gavrilov N.M., Kandieva K.K., et al. Numerical simulation of stratospheric QBO impact on the planetary waves up to the thermosphere. *Scientific Reports.* 2022, vol. 12, 21701. DOI: [10.1038/s41598-022-26311-x](https://doi.org/10.1038/s41598-022-26311-x).

Kurdyeva Yu., Bessarab F., Borchevskina O., Klimenko M. Model study of the influence of atmospheric waves on variations of upper atmosphere and ionosphere parameters during a meteorological storm on May 29, 2017. *Adv. Space Res.* 2024, vol. 74, no. 5, pp. 2463–2474. DOI: [10.1016/j.asr.2024.05.062](https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.05.062).

Lay E. H. Ionospheric irregularities and acoustic-gravity wave activity above low-latitude thunderstorms. *Geophys. Res. Lett.* 2018, vol. 45, pp. 90–97. DOI: [10.1002/2017GL076058](https://doi.org/10.1002/2017GL076058).

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.* 2017, vol. 161, pp. 43–54. DOI: [10.1016/j.jastp.2017.06.012](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.06.012).

Namgaladze A.A., Korenkov Yu.N., Klimenko V.V., et al. Numerical modelling of the thermosphere-ionosphere-protonosphere system. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1991, vol. 53, iss. 11–12, pp. 1113–1124. DOI: [10.1016/0021-9169\(91\)90060-K](https://doi.org/10.1016/0021-9169(91)90060-K).

Pancheva D., Mukhtarov P., Smith A. Climatology of the migrating terdiurnal tide (TW3) in SABER/TIMED temperatures. *J. Geophys. Res.-Space.* 2013, vol. 118, pp. 1755–1767. DOI: [10.1002/jgra.50207](https://doi.org/10.1002/jgra.50207).

Pedatella N.M., Forbes J.M. Modulation of the equatorial F-region by the quasi-16-day planetary wave. *Geophys. Res. Lett.* 2009, vol. 36, L09105. DOI: [10.1029/2009GL037809](https://doi.org/10.1029/2009GL037809).

Pedatella N.M., Liu H.-L. The influence of internal atmospheric variability on the ionosphere response to a geomagnetic storm. *Geophys. Res. Lett.* 2018, vol. 45, pp. 4578–4585. DOI: [10.1029/2018GL077867](https://doi.org/10.1029/2018GL077867).

Rahmani Y., Alizadeh M.M., Schuh H., et al. Probing vertical coupling effects of thunderstorms on lower ionosphere using GNSS data. *Adv. Space Res.* 2020, vol. 66, no. 8, pp. 1967–1976. DOI: [10.1016/j.asr.2020.07.018](https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.07.018).

Schaer S. Mapping and predicting the Earth's ionosphere using the global positioning system: PhD thesis. Bern: University of Bern, 1999, 205 p.

Strickland D.J., Evans J.S., Paxton L.J. Satellite remote sensing of thermospheric O/N<sub>2</sub> and solar EUV. 1. Theory. *J. Geophys. Res.* 1995, vol. 100, no. A7, pp. 12217–12226. DOI: [10.1029/95JA00574](https://doi.org/10.1029/95JA00574).

Šindelářová T., Burešová D., Chum J., et al. Doppler observations of infrasonic waves of meteorological origin at ionospheric heights. *Adv. Space Res.* 2009, vol. 43, pp. 1644–1651. DOI: [10.1016/j.asr.2008.08.022](https://doi.org/10.1016/j.asr.2008.08.022).

Wang J.C., Tsai-Lin R., Chang L.C., et al. Modeling study of the ionospheric responses to the quasi-biennial oscillations of the Sun and stratosphere. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2018, vol. 171, pp. 119–130. DOI: [10.1016/j.jastp.2017.07.024](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.07.024).

Yiğit E., Medvedev A.S. Internal wave coupling processes in Earth's atmosphere. *Adv. Space Res.* 2015, vol. 55, iss. 4, pp. 983–1003. DOI: [10.1016/j.asr.2014.11.020](https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.11.020).

URL: <https://guvitimed.jhuapl.edu> (дата обращения 16 апреля 2025 г.).

URL: <https://rscf.ru/project/25-27-00213/> (дата обращения 16 апреля 2025 г.).

*Как читировать эту статью:*  
Карпов И.В., Бессараб Ф.С., Борчевкина О.П. Численное моделирование пространственных возмущений ионосферы от локальных тропосферных источников. *Солнечно-земная физика.* 2025, т. 11, № 4, с. 71–78. DOI: [10.12737/szf-114202507](https://doi.org/10.12737/szf-114202507).