

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АТМОСФЕРНЫХ ВОЛН, ГЕНЕРИРУЕМЫХ ТРОПОСФЕРНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ, НА ВАРИАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ И ИОНОСФЕРЫ

Ю.А. Курдяева, Ф.С. Бессараб, О.П. Борчевкина, М.В. Клименко

Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н. В. Пушкова Российской академии наук, Калининград, Россия,
yakurdyeva@gmail.com

STUDY OF THE INFLUENCE OF ATMOSPHERIC WAVES GENERATED BY TROPOSPHERIC SOURCES ON VARIATIONS OF THE UPPER ATMOSPHERE AND IONOSPHERIC PARAMETERS

Yu.A. Kurdyeva, F.S. Bessarab, O.P. Borchevkina, M.V. Klimenko

Kaliningrad Branch of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS,
Kaliningrad, Russia

Аннотация. В работе продемонстрированы результаты численного моделирования распространения акустических и внутренних гравитационных волн, распространяющихся из тропосферы, с применением численной региональной модели атмосферы высокого разрешения AtmoSym и Глобальной самосогласованной модели Термосферы, Ионосферы и Протоносферы (ГСМ ТИП). Показано, что важнейшим механизмом, определяющим изменение пространственной структуры возмущений ПЭС при воздействии атмосферных волн, является возмущения компонент термосферного ветра. Показано, распространение атмосферных волн влияет на изменение электрического поля и приводит к магнитосопряженному эффекту.

Ключевые слова: акустические волны, внутренние гравитационные волны, термосфера, ионосфера

Abstract. The paper demonstrates the results of numerical modeling of the propagation of acoustic and internal gravity waves propagating from the troposphere using the numerical regional high-resolution atmospheric model AtmoSym and the Global Self-Consistent Model of the Thermosphere, Ionosphere and Protonosphere (GSM TIP). It is shown that the most important mechanism determining the change in the spatial structure of TEC perturbations under the influence of atmospheric waves is perturbations of the thermospheric wind components. It is shown that the propagation of atmospheric waves affects the change of the electric field and leads to the magnetoconjugate effect.

Keywords: acoustic waves, internal gravity waves, thermosphere, ionosphere

ВВЕДЕНИЕ

Результаты исследований последних лет [Borchevkina et al., 2021; Chernigovskaya et al., 2015] показывают значительный вклад волновых процессов в нижней и средней атмосфере в изменчивость параметров ионосферы. Одним из значимых волновых процессов в атмосфере является распространение акустических (АВ) и внутренних гравитационных волн (ВГВ), генерируемых в тропосфере метеорологическими источниками.

В данной работе численно исследовано влияние АВ и ВГВ верхнюю атмосферу и ионосферу с использованием нового подхода к воспроизведению волновых эффектов в крупномасштабной модели без учета параметризации волн от тропосферных источников. Для моделирования распространения волн был выбран период 29 мая 2017 г. В этот день над территорией Московского региона (55° с.ш., 37° в.д.) наблюдалось сильное метеорологическое событие [Куличков и др., 2019], которое стало источником широкого спектра волн. Данное метеорологическое событие наблюдалось на фоне восстановительной фазы геомагнитной бури, основная фаза которой пришлась на 27–28 мая 2017 г.

ЧИСЛЕННЫЕ РАСЧЕТЫ

Для численного исследования были привлечены численная модель атмосферы высокого разрешения AtmoSym [Gavrilov, Kshevetskii, 2014] и Глобальная самосогласованная модель Термосферы,

Ионосферы и Протоносферы (ГСМ ТИП) [Namgaladze et al., 1991]. Модель AtmoSym основана на решении системы нелинейных гидродинамических уравнений и адаптирована для решения задач о распространении волн, вызванных вариациями давления на поверхности Земли [Kurdyeva et al., 2018]. Модель ГСМ ТИП основана на численном интегрировании системы квазигидродинамических уравнений непрерывности, движения и теплового баланса для нейтральных и заряженных частиц холодной околоземной плазмы совместно с уравнением для электрического потенциала в интервале высот от 80 км до геоцентрического расстояния ~15 земных радиусов с учетом несовпадения географической и геомагнитной осей.

Основные этапы реализации используемого подхода включают в себя: моделирование распространения АВ и ВГВ с применением нелинейной гидродинамической модели атмосферы высокого разрешения с источником возмущений, заданным на основе экспериментальных данных; расчет локальных спектральных характеристик наблюдаемых волн; расчет притока тепла, обусловленного распространением рассчитанных волн; включение рассчитанного притока тепла в виде дополнительного источника в крупномасштабной модели.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Далее будут рассмотрены результаты расчета без включения волнового источника тепла в

крупномасштабную модель (M1) и расчета с включением источника волнового тепла (M2). Результаты расчетов (рис. 1) показали, что распространение волн из тропосферы приводит к: локальному разогреву термосферы и уменьшению $n[O]/n[N_2]$ над областью генерации волн; формированию дипольно-подобной структуры возмущений ПЭС с положительными и отрицательными значениями в окрестности источника атмосферных волн. Механизмом формирования такой структуры является нейтральный ветер, главным образом его меридиональная компонента. Известно, что на высотах F-области ионосферы ветер, направленный к экватору, способствует росту электронной концентрации за счет подъема плазмы в область меньших скоростей химических потерь, а ветер, направленный к полюсу, приводит к опусканию плазмы и соответственно к уменьшению электронной концентрации.

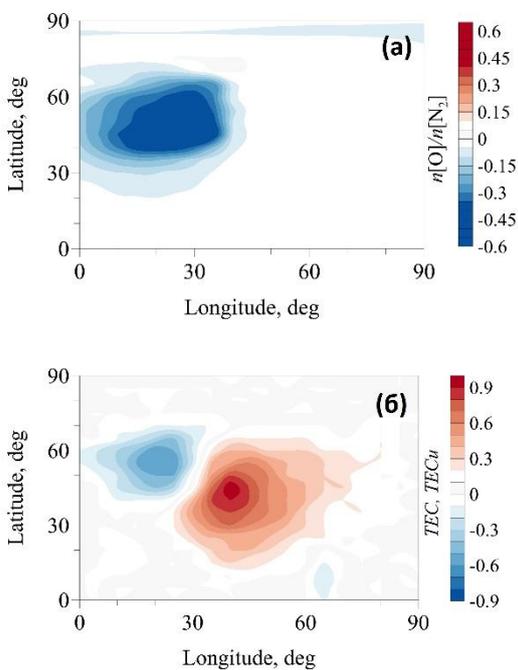


Рис. 1. Широтно-долготные распределения возмущений (M2–M1) $n[O]/n[N_2]$ (а) и ПЭС (б) на высоте 250 км (M2–M1) для момента времени 04:00 UT

С течением времени в западном направлении относительно области локализации источника появляются более мелкомасштабные возмущения ПЭС. Анализ изменения зональной скорости показал, что в европейском регионе в этот период времени происходит смена направления зонального ветра (с западного на восточный). Можно предположить, что смена направления зонального ветра приводит к эффектам, связанным с волновой фильтрацией [Kurdyueva et al., 2022; Medvedev et al., 2017] ветром. Известно, что если волны распространяются в направлении, противоположном направлению ветра, то амплитуда этих волн увеличивается, а масштабы возмущений уменьшаются. Если ветер и волны распространяются сонаправлено, то амплитуда волн уменьшается, а масштабы увеличиваются.

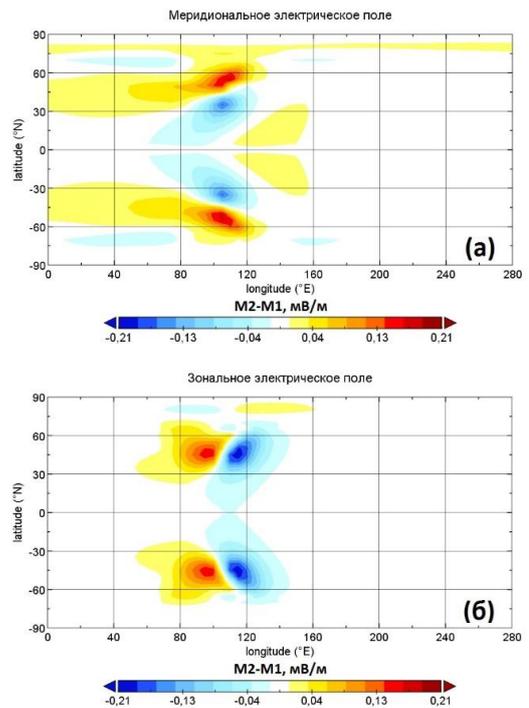


Рис. 2. Широтно-долготные распределения возмущений (мВ/м) меридионального (а) и зонального (б) электрического поля для момента времени 04:00 UT (геомагнитные координаты)

Изменения зонального и меридионального электрического поля (рис. 2) в проведенных расчетах также демонстрируют изменения преимущественно дипольного характера. При этом такие же изменения наблюдаются в магнитосопреженной точке. Изменения электрического поля, вызванные распространением волн из тропосферы, достигают 11% относительно фоновых значений в области локализации источника.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ ионосферных характеристик в проведенных расчетах показал, что распространение атмосферных волн в верхнюю атмосферу приводит к понижению $n[O]/n[N_2]$. Во время работы теплового источника в ионосфере в области локализации теплового источника наблюдается появление дипольной структуры в ПЭС: положительное возмущение ПЭС юго-восточней источника волновой активности; отрицательное возмущение ПЭС северо-западной источника волновой активности. Показано, что важнейшим механизмом, определяющим дипольноподобную пространственную структуру возмущений ПЭС при воздействии атмосферных волн, является возмущения меридиональной компоненты термосферного ветра. Зональный ветер также оказывает влияние на структуру и интенсивность возмущений ПЭС. Показано, что распространение атмосферных волн влияет на изменение электрического поля.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-77-10004, <https://rscf.ru/project/23-77-10004/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Borchevkina O.P., Kurdyeva Y.A., Karpov I.V. et al. Disturbances of the thermosphere and the ionosphere during a meteorological storm // *Atmosphere*. 2021. V. 12, N 11. P. 1384.
- Chernigovskaya M.A., Shpynev B.G., Ratovsky K.G. Meteorological effects of ionospheric disturbances from vertical radiosounding data // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2015. V. 136B. P. 235–243. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2015.07.006>.
- Куличков С.Н., Чунгузов И.П., Попов О.Е. и др. Внутренние гравитационные и инфразвуковые волны во время урагана в Москве 29 мая 2017 г. // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2019. Т. 55, № 2. С. 32–40.
- Gavrilov N.M., Kshevetskii S.P. Three-dimensional numerical simulation of nonlinear acoustic-gravity wave propagation from the troposphere to the thermosphere // *Earth Planets Space*. 2014. V. 66, N 88. <https://doi.org/10.1186/1880-5981-66-88>.
- Namgaladze A.A., Korenkov Y.N., Klimenko V.V. et al. Numerical modelling of the thermosphere-ionosphere-protonosphere system. // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 1991. V. 53. P. 1113–1124. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(91\)90060-K](https://doi.org/10.1016/0021-9169(91)90060-K).
- Kurdyeva Y.A., Kshevetskii S.P., Gavrilov N.M., Kulichkov S.N. Correct boundary conditions for the high-resolution model of nonlinear acoustic-gravity waves forced by atmospheric pressure variations // *Pure and Applied Geophysics*. 2018. V. 175, N 10. P. 3639–3652. <https://doi.org/10.1007/s00024-018-1906-x>.
- Kurdyeva Yu.A., Kshevetsky S.P., Borchevkina O.P., Karpov M.I. Wind effects in the thermosphere during the propagation of atmospheric waves generated by a tropospheric heat source // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2022. V. 62, N 4. P. 453–459. DOI: 10.1134/s0016793222040119
- Medvedev A.V., Ratovsky K.G., Tolstikov M.V. et al. Relation of internal gravity wave anisotropy with neutral wind characteristics in the upper atmosphere // *J. Geophys. Res.* 2017. V. 122, N 7. P. 7567.