

УДК 535.71

ВОЗМУЩЕНИЯ ИОНОСФЕРЫ ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЛОКАЛИЗОВАННЫХ ТЕРМОСФЕРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

© 2020 г. И. В. Карпов^{1, 2, *}, П. А. Васильев¹

¹Калининградский филиал Института земного магнетизма,
ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Калининград, Россия

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

*e-mail: ivkarпов@inbox.ru

Поступила в редакцию 11.11.2019 г.

После доработки 09.12.2019 г.

Принята к публикации 23.01.2020 г.

В работе представлены результаты численного моделирования ионосферных возмущений от пространственно локализованных среднеширотных термосферных источников, которые имитируют эффект диссипации акустико-гравитационных волн, порожденных явлениями на поверхности Земли и в нижней атмосфере. Результаты численных расчетов показали, что область возникающих ионосферных эффектов значительно превосходит размеры области источников термосферных возмущений и достигает низких широт. В пространственном распределении критической частоты $F2$ -слоя ионосферы отмечается ее понижение непосредственно над термосферным источником и повышение к югу от него. Отрицательные ионосферные возмущения обусловлены уменьшением парциальной концентрации атомарного кислорода в области термосферного источника. Наиболее эффективно на снижение электронной концентрации в ионосфере влияют процессы турбулентной диффузии, приводящие к понижению концентрации атомарного кислорода в нижней термосфере. Развивающиеся крупномасштабные циркуляционные процессы в термосфере приводят к положительным ионосферным возмущениям, отмечающимся к югу от области источников вплоть до низких широт.

DOI: 10.31857/S0016794020040069

1. ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальные исследования показывают, что разнообразные явления в нижней атмосфере и на поверхности Земли могут служить источниками ионосферных возмущений.

Примеры ионосферных возмущений, возникающих в периоды прохождения метеорологических штормов, ураганов, тайфунов, а также во время развития стратосферных потеплений, возмущений сейсмической активности, цунами, представлены в работах [Martinis and Manzano, 1999; Rancheva and Mukhtarov, 2011; Chernigovskaya et al., 2015; Yigit et al., 2016; Борчевкина и Карпов, 2017; Li et al., 2017].

Ионосферные возмущения, вызываемые такими явлениями, достаточно разнообразны. Так, ионосферные предвестники землетрясений на средних широтах проявляются в виде положительных возмущений, а реакция на метеорологические шторма чаще проявляется в виде отрицательных возмущений [Pulinets and Boyarchuk, 2004, Борчевкина и Карпов, 2017]. Ионосферный отклик на процессы в нижней атмосфере может появляться в течение нескольких часов после их

начала, а амплитудные характеристики возмущений критической частоты $F2$ -слоя ($foF2$) и полного электронного содержания (ТЕС) могут достигать 50% от фоновых значений.

В качестве механизма столь быстрого распространения возмущения из нижней атмосферы в ионосферу рассматриваются акустико-гравитационные волны (АГВ) [Борчевкина и Карпов, 2017]. При этом большое внимание уделяется инфразвуковым волнам и внутренним гравитационным волнам с периодами, близкими к периоду Вайсяля–Брента. Теоретические исследования показывают, что такие волны могут быстро и практически вертикально распространяться из нижних слоев атмосферы и достигать высот ионосферы [Петрухин и др., 2012; Карпов и Кшевецкий, 2014]. В работах [Hickey et al., 2011; Карпов и Кшевецкий, 2014] было показано, что вследствие диссипации таких волн возникают локальные области нагрева термосферы. Появление термосферных возмущений, в свою очередь, влияет на ионизационные и рекомбинационные процессы, что и приводит к изменению состояния ионосферы.

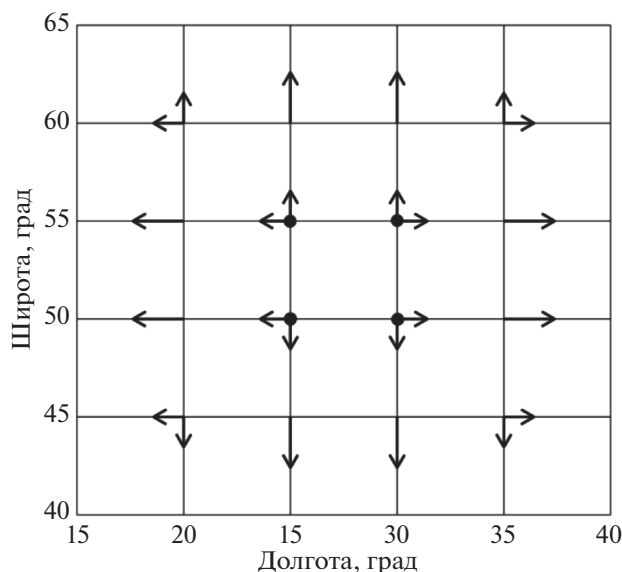


Рис. 1. Схема расположения источников нагрева и плотности (черные точки) и компонент скорости (стрелки) в узлах сетки модели ГСМ ТИП.

В работе [Vasilev et al., 2018] исследованы возмущения параметров термосферы и ионосферы, создаваемые точечными источниками нагрева термосферы. Полученные результаты позволяют объяснить некоторые особенности возникающих ионосферных возмущений, однако амплитудные значения ионосферных эффектов значительно меньше наблюдаемых в условиях метеорологических возмущений. Это означает, что наблюдаемые ионосферные возмущения определяются более сложным комплексом процессов, которые развиваются в термосфере вследствие возмущений в нижней атмосфере.

Целью настоящей работы являлось продолжение исследований механизмов формирования ионосферных возмущений, вызываемых локальными термосферными источниками, и выявление наиболее важных факторов, определяющих реакцию ионосферы.

2. ОПИСАНИЕ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Исследование влияния локальных возмущений термосферы на состояние термосферы и ионосферы выполнено методами математического моделирования. Численные эксперименты были поставлены в Глобальной самосогласованной модели термосферы, ионосферы и протонсферы (ГСМ ТИП), позволяющей исследовать крупномасштабные процессы в верхней атмосфере и ионосфере [Намгаладзе и др., 1990].

В качестве источников возмущений среднеширотной термосферы рассмотрены локализо-

ванные по высоте в заданной широтно-долготной области возмущения температуры, ветра и плотности, имитирующие результат диссипации в верхней атмосфере АГВ с периодами не более получаса [Карпов и Бессараб, 2008; Карпов и Кшевецкий, 2014]. В уравнения модели включены дополнительные источники нагрева, плотности и компонент ветра, схема пространственного расположения которых представлена на рис. 1.

Величина добавки к тому или иному параметру определялась по формуле

$$Q = A \exp\left(-\frac{|r - r_0|}{H}\right),$$

где r – текущая высота; r_0 – высота максимума источника; H – высота однородной атмосферы; A – амплитудный множитель; Q – мощность источника. Вертикальный профиль источников и высота их максимумов r_0 были определены исходя из качественных оценок результатов моделирования диссипации АГВ от приземного источника [Карпов and Kshevetski, 2017].

Для источника нагрева амплитудный множитель A подбирался таким образом, чтобы величина максимального нагрева термосферы на высоте r_0 составляла ~ 100 К, а для горизонтальных компонент ветра – 100 м/с, что соответствует оценкам Карпов and Kshevetski [2017]. Добавка к плотности $\Delta\rho_d$ была связана с источником нагрева, обеспечивающим добавку к температуре ΔT_d , и определялась через поляризационное соотношение для крупномасштабных волн низкой частоты [Григорьев, 1999]:

$$\frac{\Delta T_d}{T} = -\frac{\Delta\rho_d}{\rho},$$

где T и ρ – фоновые значения температуры и плотности.

В ходе численных расчетов амплитуды источников увеличивались в течение двух часов для достижения заданных значений возмущений термосферных параметров и в дальнейшем обеспечивали их постоянство.

В выполненных численных экспериментах ряд параметров источника варьировался с целью моделирования различных вариантов воздействия термосферного возмущения на ионосферные параметры. В частности, менялась амплитуда и продолжительность работы источника, высота его максимума и вертикальный профиль. Изменение высоты источника обуславливается зависимостью от процессов молекулярной диффузии и теплопроводности, а также от частотных характеристик распространяющихся АГВ: чем меньше период волн, тем больше высота, на которую они могут проникнуть в термосферу. Таким образом, высота максимума источника характеризует ча-

стоты АГВ, принимающих участие в формировании возмущений термосферы и ионосферы.

Кроме того, было рассмотрено воздействие АГВ на верхнюю атмосферу через усиление турбулентных процессов на высотах нижней термосферы. Процессы турбулентной диффузии ведут к уменьшению относительной концентрации атомарных составляющих газового состава термосферы в области турбулентности [Карпов и Намгаладзе, 1988; Yügit and Medvedev, 2015]. Это приводит к изменению условий протекания процессов ионизации и рекомбинации, что может оказывать влияние на состояние ионосферы.

С целью исследования чувствительности изменений газового состава термосферы на реакцию ионосферы был выполнен численный расчет с включением источника снижения концентрации атомарного кислорода в области прохождения АГВ с максимумом на нижней границе моделируемого пространства. Амплитудные характеристики интенсивности источника оценивались по результатам расчетов [Карпов и Намгаладзе, 1988].

Расчеты проводились для состояния верхней атмосферы, соответствующей зимним условиям северного полушария. Возмущения параметров термосферы и ионосферы определялись в сравнительном анализе результатов расчетов суточной динамики невозмущенной атмосферы и расчетов, учитывающих воздействие на термосферу и ионосферу локального пространственного источника возмущений.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Расчеты с включением только пространственного источника нагрева показали, что, как и в случае точечного источника термосферного возмущения [Vasilev et al., 2018], реакция ночной ионосферы мала и не превышает нескольких процентов от фоновых значений $foF2$ и ТЕС. Амплитудные возмущения ионосферы незначительно усиливаются, но не превышают 0.1 МГц для $foF2$. Более того, динамика ионосферных эффектов в дневное время практически не зависит от наличия или отсутствия источника нагрева ночью, целиком определяясь параметрами работы источника днем.

Максимальная амплитуда дневных возмущений ионосферы, порожденных работой теплового источника, в сравнении с ее фоновым состоянием в большинстве проведенных расчетов регистрировалась в 16:00 UT. На рисунке 2а показано распределение $foF2$, рассчитанное для теплового источника с максимумом нагрева на высоте 160 км. Как видно из рисунка, в пространственной структуре амплитуд возмущения $foF2$ отмечаются отрицательные ионосферные эффекты непосредственно над источником, а также к западу и северо-западу от него. К югу и юго-востоку от

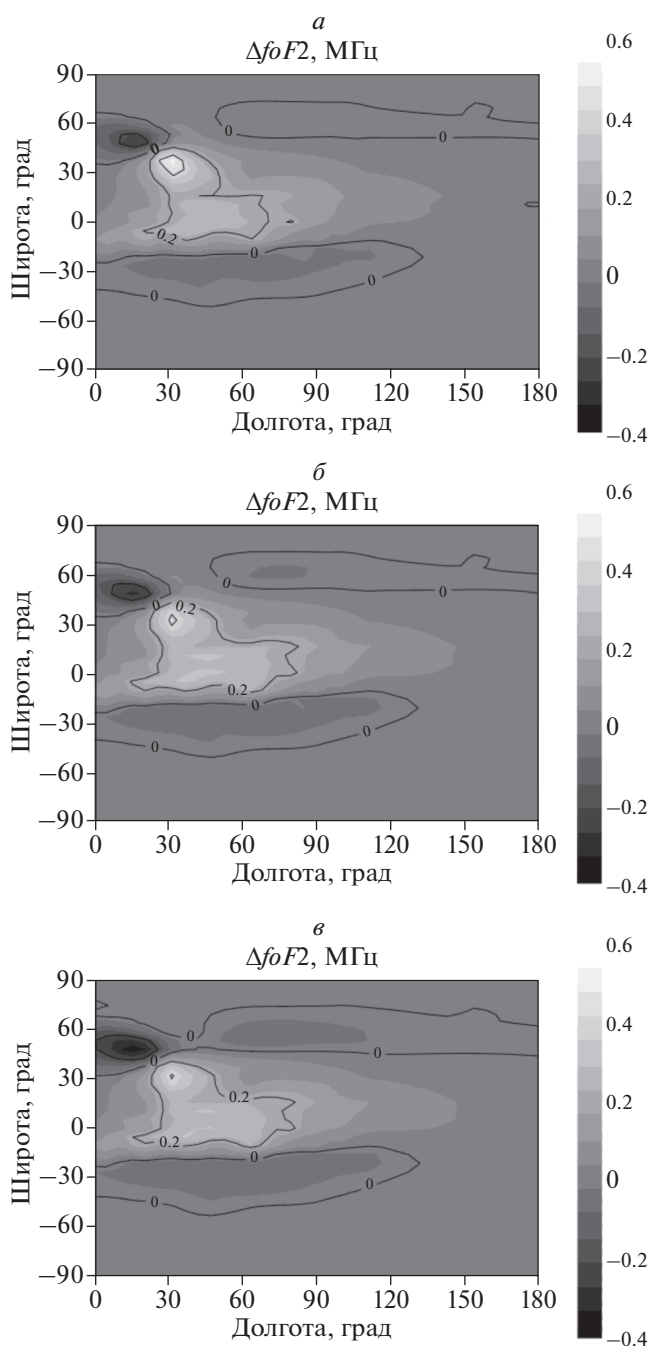


Рис. 2. Распределение добавки к $foF2$ в 16:00 UT для источников: нагрева термосферы на высоте 160 км (а); нагрева и ветра (б); нагрева, ветра и снижения концентрации атомарного кислорода (в).

источника формируется область положительных ионосферных возмущений, которая распространяется в низкие широты вплоть до экваториальных широт.

Результаты численных экспериментов с варьирующейся высотой максимума источника нагрева от 140 до 200 км и различными видами его

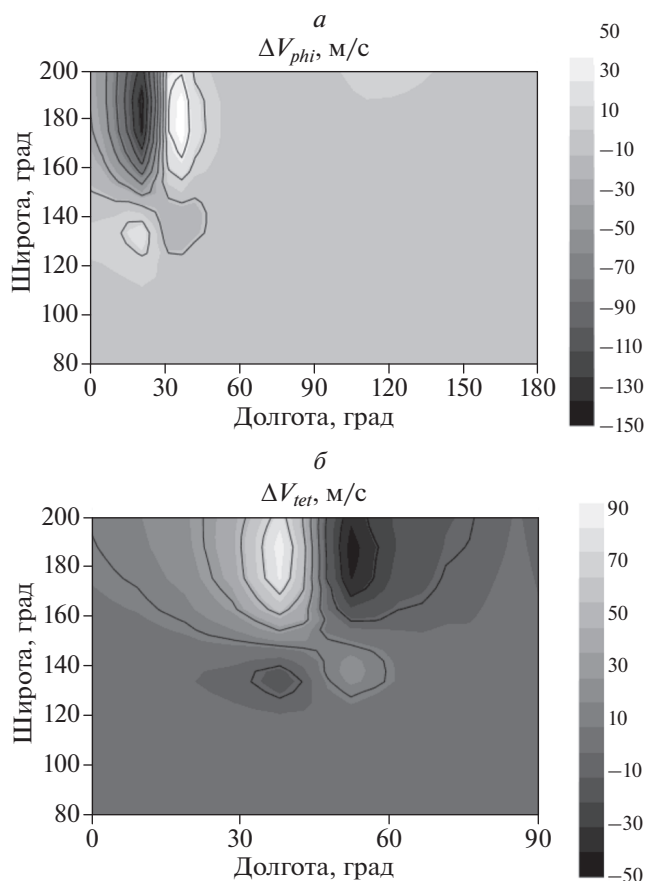


Рис. 3. Добавки к компонентам горизонтальной скорости в 16:00 UT.

вертикального профиля показали, что такая пространственная структура ионосферного отклика сохраняется при любом источнике термосферного нагрева. Величина положительной добавки к $foF2$ пропорциональна величине нагрева на высоте выше 150 км и при максимальном нагреве в 100 К составляет ~ 1 МГц. Отрицательная добавка также связана с величиной нагрева, но растет слабее и достигает не более -0.4 МГц.

Включение дополнительных источников как горизонтальных, так и вертикальной скоростей не приводит к существенным изменениям в картине ионосферного отклика (рис. 2б). Характерная структура распределения добавки к $foF2$ сохранилась, а изменение амплитудных значений не превысило 10% в сравнении с эффектами, возникающими при включении теплового источника.

В целом, включение дополнительных источников возмущений температуры и ветра, влияющих на динамическое состояние термосферы, приводит к развитию циркуляционных процессов вдоль границы области возмущения. Причем в верхней термосфере, выше максимума источника, формируется антициклоническая ячейка, а в

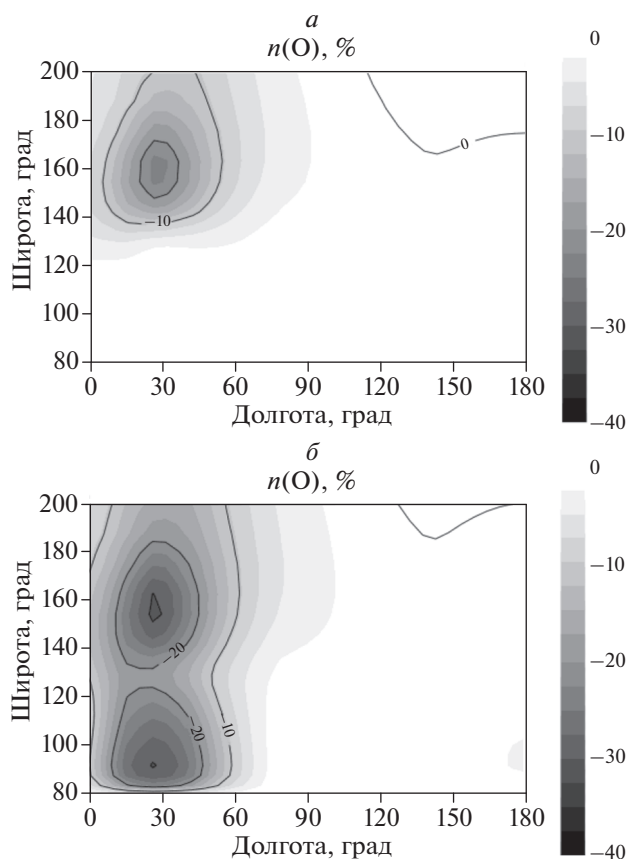


Рис. 4. Возмущение концентрации атомарного кислорода при работе обычного термосферного источника (а) и при включении дополнительного источника понижения концентрации атомарного кислорода в нижней термосфере (б) в 16:00 UT.

нижней термосфере — циклоническая (рис. 3). Развитие такого крупномасштабного процесса в термосфере, очевидно, приводит к соответствующим изменениям состояния ионосферы и определяет расширение области ионосферных возмущений в сравнении с размерами области термосферы, в которой действуют дополнительные источники возмущений. Однако, как и в случае учета только точечных тепловых источников термосферных возмущений, амплитудные характеристики ионосферных возмущений существенно меньше наблюдаемых.

Результаты расчетов с включением дополнительного источника снижения концентрации атомарного кислорода в нижней термосфере, имитирующим влияние АГВ на турбулентные процессы, демонстрируют более существенное влияние возмущений газового состава термосферы на реакцию ионосферы в сравнении с возмущениями, создаваемыми динамическими источниками (рис. 2в).

На рисунке 4 показаны возмущения концентрации атомарного кислорода в расчете, включающем только дополнительный источник нагрева

термосферы (рис. 4а) и в расчете с учетом понижения концентрации атомарного кислорода в нижней термосфере (рис. 4б). Из них видно, что понижение концентрации атомарного кислорода в нижней термосфере приводит к снижению его концентрации на всех высотах над областью возмущений, инициируемых АГВ.

Снижение концентрации атомарного кислорода в нижней термосфере на 30% по сравнению с фоновым невозмущенным состоянием приводит к существенным изменениям в ионосфере: величина максимального снижения $foF2$ увеличивается на 0.15 МГц по сравнению с амплитудами отрицательных возмущений, создаваемых динамическими источниками возмущений термосферы, и достигает -0.5 МГц. Область отрицательного эффекта к северо-западу от источника расширяется, а величина положительного эффекта к юго-востоку от него — уменьшается (рис. 1б).

Таким образом, результаты численных экспериментов показывают, что наиболее эффективным процессом, влияющим на снижение электронной концентрации над источником АГВ в нижней атмосфере, является усиление турбулентных процессов в нижней термосфере. Учет процессов понижения концентрации атомарного кислорода в термосфере, в принципе, позволяет получить наблюдаемые величины ионосферных возмущений.

4. ВЫВОДЫ

Цель проведенных численных экспериментов заключалась в исследовании механизмов формирования ионосферных возмущений, вызываемых локальными термосферными источниками. Предполагалось, что эти источники обусловлены процессами распространения и диссипации в термосфере АГВ, возбуждаемых в нижней атмосфере в периоды метеорологических возмущений. В наблюдениях ионосферы в таких условиях были выявлены существенные понижения ионосферных параметров ТЕС и $foF2$.

Результаты численных расчетов с включением дополнительных термосферных источников, имитирующих процессы диссипации АГВ от источников в нижней атмосфере, показали следующее.

1. Термосферные возмущения, вызываемые такими источниками, приводят к понижению электронной концентрации непосредственно над источником АГВ и повышению ее к югу от него. Ионосферные возмущения слабо зависят от изменений вертикального профиля источника и высоты его максимума, сохраняя характерную пространственную структуру и отличаясь лишь значениями положительных и отрицательных возмущений.

2. Отрицательные ионосферные возмущения связаны с изменениями газового состава термосферы: снижением концентрации атомарного кислорода, приводящим к понижению скорости ионизации. Наиболее эффективно на снижение электронной концентрации в ионосфере влияют процессы турбулентной диффузии, приводящие к понижению концентрации атомарного кислорода в нижней термосфере.

3. Развивающиеся, при работе рассмотренных источников возмущений, крупномасштабные циркуляционные процессы в термосфере приводят к положительным ионосферным возмущениям, отмечающимся к югу от области источников вплоть до низких широт.

Полученные результаты показывают, что термосферные возмущения, обусловленные дополнительными источниками тепла и ветра вследствие диссипации АГВ, не являются основным фактором, определяющим отрицательные ионосферные возмущения над источником волн. Изменение газового состава нижней термосферы вследствие турбулентной диффузии более эффективно влияет на амплитудные значения отрицательной ионосферной реакции. Вместе с тем, дополнительные термосферные источники вследствие диссипации АГВ формируют крупномасштабные возмущения в области источника, которые определяют положительные возмущения ионосферы к югу от источника вплоть до экваториальной области. Пример возникновения схожей ионосферной реакции представлен в работе [Карпов и др., 2019], где на основе анализа наблюдений ТЕС показано, что в период развития на средних широтах метеорологического шторма возникает положительное возмущение в экваториальной области.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований грант № 18-05-00184 А (Карпов И.В.) и Российского научного фонда грант № 17-17-01060 (Васильев П.А.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Борчевкина О.П., Карпов И.В. Ионосферные неоднородности в периоды метеорологических возмущений // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 57. № 5. С. 670–675. 2017.
- Григорьев Г.И. Акустико-гравитационные волны в атмосфере Земли (обзор) // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 42. № 1. С. 3–25. 1999.
- Карпов И.В., Намгаладзе А.А. О причинах изменений газового состава в термосфере // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 28. № 2. С. 246–251. 1988.
- Карпов И.В., Бессараб Ф.С. Модельное исследование влияния солнечного терминатора на параметры тер-

- мосферы // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 48. № 2. С. 217–227. 2008.
- *Карпов И.В., Кшевецкий С.П.* Механизм формирования крупномасштабных возмущений в верхней атмосфере от источников АГВ на поверхности земли // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 54. № 4. С. 553–562. 2014.
- *Карпов И.В., Борчевкина О.П., Карпов М.И.* Локальные и региональные возмущения ионосферы в периоды метеорологических возмущений // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 59. № 4. С. 492–500. 2019.
- *Намгаладзе А.А., Кореньков Ю.Н., Клименко В.В., Карпов И.В., Бессараб Ф.С., Суроткин В.А., Глущенко Т.А., Наумова Н.М.* Глобальная численная модель термосферы, ионосферы и протоносферы Земли // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 30. № 4. С. 612–619. 1990.
- *Петрухин Н.С., Пелиновский Е.Н., Бацына Е.К.* Безотражательные акустико-гравитационные волны в атмосфере земли // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 52. № 6. С. 854–860. 2012.
- *Chernigovskaya M.A., Shpynev B.G., Ratovsky K.G.* Meteorological effects of ionospheric disturbances from vertical radio sounding data // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 136. P. 235–243. 2015.
- *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. 116. A12326. 2011. doi 016792 <https://doi.org/10.1029/2010JA>
- *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. V. 164. P. 89–96. 2017.
- *Li W., Yue J., Yang Y., Li Z., Guo J., Pan Y., Zhang K.* Analysis of ionospheric disturbances associated with powerful cyclones in East Asia and North America // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 161. P. 43–54. 2017.
- *Martinis C.R., Manzano J.R.* The influence of active meteorological systems on the ionosphere F region // Ann. Geofisica. V. 42. № 1. P. 1–7. 1999.
- *Pancheva D., Mukhtarov P.* Stratospheric warmings: The atmosphere–ionosphere coupling paradigm // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 73. № 13. P. 1697–1702. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2011.03.006>
- *Pulinets S., Boyarchuk K.* Ionospheric precursors of earthquakes. 315 p. 2004. <https://doi.org/10.1007/b137616>
- *Vasilev P.A., Karpov I.V., Borchevkina O.P.* Modeling of ionospheric disturbances caused by meteorological storms // Atmosphere, ionosphere, safety. Ed. I.V. Karpov, O.P. Borchevkina, Kaliningrad. Pt. 1. P. 69–73. 2018.
- *Yiugit E., Medvedev A.S.* Internal wave coupling processes in Earth's atmosphere // Adv. Space Res. V. 55. I. 4. P. 983–1003. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.11.020>
- *Yigit E., Knizova P. K., Georgieva K., Ward W.* A review of vertical coupling in the Atmosphere–Ionosphere system: Effects of waves, sudden stratospheric warmings, space weather, and of solar activity // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 141. P. 1–12. 2016.