УДК 551.511.3

ВЕТРОВЫЕ ЭФФЕКТЫ В ТЕРМОСФЕРЕ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ АТМОСФЕРНЫХ ВОЛН, ГЕНЕРИРУЕМЫХ ТЕПЛОВЫМ ТРОПОСФЕРНЫМ ИСТОЧНИКОМ

© 2022 г. Ю. А. Курдяева^{1, *}, С. П. Кшевецкий², О. П. Борчевкина¹, М. И. Карпов¹

¹Западное Отделение Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ЗО ИЗМИРАН), г. Калининград, Россия ²Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта, г. Калининград, Россия *e-mail: yakurdyaeva@gmail.com Поступила в редакцию 19.10.2021 г.

После доработки 21.02.2022 г. Принята к публикации 30.03.2022 г.

Представлены результаты численного исследования процессов распространения в термосферу внутренних гравитационных волн, возбуждаемых тепловыми источниками в тропосфере. Результаты численных экспериментов показали, что термосферные возмущения от таких источников возникают через ~30 мин после начала их действия. Причиной появления быстрой реакции термосферы являются инфразвуковые волны, возбуждаемые при генерации внутренних гравитационных волн. Показано, что термосферный ветер существенно влияет на пространственно-временну́ю структуру волновых возмущений в верхней атмосфере. Это влияние проявляется в повышении амплитуд и уменьшении пространственных масштабов волн, распространяющихся потив термосферного ветра, отмечается понижение амплитуд и увеличение пространственных масштабов.

DOI: 10.31857/S0016794022040113

1. ВВЕДЕНИЕ

В экспериментальных исследованиях достоверно установлено влияние тропосферных процессов на возмушение параметров термосферы и ионосферы [Борчевкина и Карпов 2017; Martinis and Manzano, 1999; Boška and Šauli, 2001; Polyakova and Perevalova, 2013; Li et al., 2017]. Одной из важных причин возмущений верхней атмосферы являются акустические и внутренние гравитационные волны (ВГВ), возбуждаемые на высотах тропосферы. Источники возбуждения таких волн разнообразны, но наиболее регулярными и энергетически мощными являются конвективные возмущения, определяющие метеорологическую обстановку [Lindzen, 1981; Fritts and Alexander, 2003; Fritts, 1989; Blanc et al., 2014], мезомасштабная турбулентность, например, [Holton, 2004], а также взаимодействие атмосферных движений с неоднородностями топографии земной поверхности [Гаврилов и Коваль, 2013].

Интерпретация экспериментальных результатов исследований параметров атмосферы и ионосферы зачастую осложнена возмущениями, обусловленными колебаниями солнечной и геомагнитной активности, что приводит к трудностям в выделении вкладов тропосферных источников в наблюдаемые вариации атмосферных параметров.

Для понимания особенностей связи процессов в тропосфере с процессами в верхней атмосфере важно проведение теоретических исследований, рассматривающих процессы, сопровождающие распространение атмосферных волн, с учетом нелинейных и диссипативных процессов.

В настоящее время совершенствование методов численного интегрирования уравнений гидродинамики позволило создать модели атмосферы, в которых адекватно учитываются нелинейные и диссипативные процессы, а также процессы генерации и распространения инфразвуковых волн и ВГВ в атмосфере, с учетом ее реальной стратификации, например, [Kshevetskii, 2001a; Hickey et al., 2001; Fritts and Alexander, 2003; Ахмедов и Куницын, 2004]. На распространение волн из тропосферы в термосферу, помимо стратификации, значительное влияние оказывают ветра. В работе [Waldock and Jones, 1986] отмечается, что атмосферные ветра в нижней атмосфере могут оказывать большое влияние на параметры волн на термосферных высотах, что приводит к значительным эффектам, наблюдаемым при экспери-



Рис. 1. Фоновые значения температуры (a), полученные по эмпирической модели NRLMSISE-00, и зональной (δ) и меридиональной (s) компонент скорости, полученные по эмпирической модели HWM14. Зональная компонента ветра направлена с запада на восток, меридиональная компонента ветра направлена с юга на север.

ментальном исследовании среднемасштабных перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ). Возможные изменения свойств атмосферных волн на разных высотах, связанные с влиянием ветра, следует учитывать при их параметризации в глобальных численных моделях атмосферы.

Цель представленной работы состоит в изучении особенностей влияния атмосферного ветра на вертикальное распространение ВГВ, генерируемых модельными тропосферными источниками.

2. ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

В численных экспериментах применялась модель нейтральной атмосферы высокого пространственного и временно́го разрешения "AtmoSym". Модель основана на решении нелинейных и негидростатических гидродинамических уравнений, что позволяет описывать процессы распространения в атмосфере как акустических, так и внутренних гравитационных волн. Применяемые в модели численные методы, интегрирования уравнений и исследование сходимости решений, подробно описаны в работах [Kshevetskii, 2001а, 2001b, 2001с]. В частности, с применением этой модели выполнен ряд теоретических исследований влияния атмосферных волн, возбуждаемых в тропосфере, на возмущения в верхней атмосфере [Кшевецкий и Куличков, 2015].

В данной работе представлены результаты численных экспериментов по моделированию возмущений в верхней атмосфере, вызванных распространением атмосферных волн из тропосферы с учетом ветровых движений в атмосфере.

В проведенных расчетах размеры области интегрирования уравнений составляли 2000 км в горизонтальном направлении и 500 км в вертикальном. В расчетах ось ОХ не имеет привязки к долготе и широте. Пространственные распределения атмосферных параметров и ветра в начальном условии задавались по эмпирическим моделям NRLMSISE-00 [Picone et al., 2002] и HWM14 [Drob et al., 2015] для зимней среднеширотной атмосферы. На рисунке 1 показаны вертикальные профили температуры и горизонтальных компонент ветра в начальных условиях.

В численных расчетах модельный тропосферный источник тепла, отражающий конвективные процессы в тропосфере, аппроксимируется гауссовой функцией:

$$f(x,z,t) = A \exp\left(-\left(\frac{x-x_0}{L_x}\right)^2 - \left(\frac{z-z_0}{L_z}\right)^2\right) \times (1)$$
$$\times (1 - e^{(t/\tau)}) \sin(\omega t),$$

где параметры x_0 и z_0 определяют вертикальную и горизонтальную координаты центра источника в расчетной области. Параметры L_x и L_z , определяют горизонтальный и вертикальный масштабы источника. В проведенных расчетах источник располагается в центре расчетной области, $x_0 =$ = 1000 км на высоте $z_0 = 6$ км. Горизонтальный и вертикальный масштабы источника заданы равными 8 км и 3 км, что соответствуют типичным размерам и расположению небольшого облака.

Амплитуда источника мала и равна A = 0.001 К/с. Выбор малых амплитуд источника возмущений определяется необходимостью обеспечения устойчивого вертикального распространения волн до высот верхней атмосферы. В работе [Кшевецкий и Гаврилов, 2003] было показано, что волны небольших амплитуд устойчивы, при этом их вертикальное распространение может приводить к образованию струйных течений и нагреву газа. При распространении волн умеренных амплитуд на высотах ~110 км возможно образование неустойчивого турбулентного пятна, а при больших амплитудах нелинейный распад волны происходит очень быстро. Параметр $\tau = 300$ с определяет медленный характер включения источника.

В наблюдениях динамики атмосферных и ионосферных параметров в условиях развития мощных тропосферных возмущений было отмечено усиление амплитуд вариаций параметров с периодами акустико-гравитационных волн. Так, в работе [Borchevkina et al., 2020] предположено, что наблюдаемое увеличение амплитуд вариаций полного электронного содержания (ПЭС) с периодами 10–16 мин связано с процессами распространения и диссипации ВГВ, приходящих из области метеорологического шторма. Сравнительный анализ вариаций ионосферного параметра ПЭС, получаемого в наблюдениях сигналов навигационных спутников GPS, и данных реанализа метеорологической обстановки, выполненный в работе [Polyakova and Perevalova, 2013], показал, что в период прохождения тропического циклона увеличиваются амплитуды вариаций ПЭС с периодами 2–20 и 20–60 мин.

В проведенных численных экспериментах выполнены расчеты возмущений параметров атмосферы, вызванных распространением внутренних гравитационных волн из тропосферы, в случае отсутствия ветра в атмосфере и с учетом влияния ветра на атмосферные возмущения. В этих экспериментах тропосферные ВГВ возбуждались локальными тепловыми монохроматическими тропосферными источниками (1), с периодами колебаний $\omega = 2\pi/900$ с или $\omega = 2\pi/1800$ с. Длительность действия тропосферных источников составляла 1 ч.

Выбор периодов волн, генерируемых модельным тропосферным источником, определен на основе экспериментальных исследований, в которых возмущения параметров атмосферы и ионосферы отмечались непосредственно над эпицентром тропосферного метеорологического возмущения. К тому же, как показано в работах [Кшевецкий и Гаврилов, 2003; Karpov and Kshevetskii, 2017; Kurdyaeva and Kshevetskii, 2021], процессы диссипации ВГВ с периодами, близкими к периоду Вяйсяля—Брента, приводят к нагреву термосферы и формированию локальных областей повышенного нагрева атмосферы. Такие изменения состояния термосферы влияют на процессы распространения ВГВ.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты расчетов возмущений термосферы, генерируемых тропосферным тепловым источником с периодами колебаний 15 мин и 30 мин через t = 0.5 ч после начала работы, в атмосфере без ветра показаны на рис. 2. Как видно из рисунка, на начальном этапе расчета возмущения термосферы отражают переходные процессы, связанные с действием тропосферных источников (рис. 2*a* и 2*b*) и включением ветра (рис. 2*б* и 2*c*). В отсутствие ветра в атмосфере, пространственная структура возмущений в верхней атмосфере симметрична относительно эпицентра возмущений в тропосфере (рис. 2*a* и 2*b*). Различия в возмущениях в термосфере, вызываемые различны

ГЕОМАГНЕТИЗМ И АЭРОНОМИЯ том 62 № 4 2022

ми источниками, определяются только в амплитудах. Включение ветра (рис. 26 и 2г) приводит к небольшим возмущениям температуры в локализованной области высот на высоте 150-300 км во всей области интегрирования уравнений модели. На рисунке 3 показаны возмущения температуры на фиксированной высоте 350 км. Как видно из рисунка, в отсутствие термосферного ветра возмущения симметричны относительно эпицентра тропосферного источника. При этом горизонтальный масштаб возмущений не зависит от периода возмущений, генерируемых тропосферным источником. Включение ветра приводит к существенному усложнению картины возмущений. Однако пространственный масштаб возмушений меняется незначительно.

Как следует из рисунков 2 и 3, возмущения в термосфере возникают в течение 30 мин после начала действия источников, что является относительно малым временем распространения для волн исследуемых периодов. Такое быстрое развитие возмущений в термосфере может быть обусловлено распространением акустических волн. В работе [Kurdyaeva and Kshevetskii, 2021] показано, что генерация ВГВ тепловым тропосферным источником не может происходить без генерации инфразвуковых волн. Заданный тепловой источник локально изменяет лишь температуру. Для возбуждения гравитационной волны необходимо обеспечить согласованные колебания температуры и плотности. Генерация сопутствующих акустических волн во время переходного процесса позволяет выполнить это условие. На рисунке 4 показано изменение волновой добавки к температуре со временем над источником с периодом 15 мин на высотах ~145 и ~190 км. Как видно из рисунка, волновая картина в момент появления первых термосферных возмущений определяется полностью акустическими волнами с характерными периодами ~5 мин и меньше. В работах [Карпов и Кшевецкий, 2014; Drobzheva and Krasnov, 2003] показано, что диссипация инфразвуковых волн в термосфере приводит к заметному нагреву локальных областей, что, в свою очередь, влияет на характер распространения волн.

На рисунке 5 представлены результаты расчетов возмущений термосферы через 2 ч после включения тропосферного источника возмущений. Из рисунка следует, что возникающая пространственная структура возмущений носит квазиволноводный характер. При этом очевидно, что влияние термосферного ветра (рис. 5δ , e) весьма существенно и проявляется в уменьшении амплитуды и увеличении пространственного масштаба волн, распространяющихся в направлении термосферного ветра. Для волн, распространяющихся и уменьшается и уменьшается пространственный масштаб. Такое изменение пространственной картины волновых



Рис. 2. Распределение волновой добавки к температуре при действии тропосферного источника тепла с периодами T = 30 мин (a, δ) или T = 15 мин (e, c) через 30 мин после начала расчета. Левая панель соответствует безветренной атмосфере, правая панель соответствует расчетам с учетом нейтрального ветра. Центр источника по оси ОХ находится в точке x = 1000 км. Стрелкой обозначено направление ветра.



Рис. 3. Вариации температуры на высоте 350 км вдоль горизонтальной оси через 30 мин после начала действия тропосферного источника тепла с периодом T = 15 мин без учета ветра (черная кривая) и с учетом ветра (черная штриховая кривая), и с периодом T = 30 мин без учета ветра (серая кривая) и с учетом ветра (серая штриховая кривая).

вариаций температуры согласуется с результатами работы [Medvedev et al., 2017]. Более отчетливо различия в структуре возмущений проявляются в различиях результатов расчетов, вызываемых тропосферным источником при наличии и отсутствии ветра. На рисунке 6 показана пространственная картина разности амплитуд термосферных возмущений (рис. 5), полученных в обоих вариантах расчетов после 2 ч после начала работы тропосферного источника. Как видно из рис. 6, в нижней термосфере (ниже 150 км) возмущения с небольшими пространственными масштабами проявляют характер волноводного распространения. В работе [Dong et al., 2021] было показано, что на высотах нижней термосферы влияние вертикальной структуры ветра приводит к волновод-

2022



-1.2 0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 Время, мин

Рис. 4. Зависимость вариаций температуры от времени над тропосферным источником с периодом T = 15 мин на высотах ~145 км (серая линия) и ~190 км (черная линия).

ному распространению ВГВ — образуется так называемый волновод Доплера. Формирование такого волновода обусловлено термосферным ветром на высотах 90—130 км и отсутствием ветра в прилегающих высотных областях. Распространение или затухание волн в таком волноводе определяется дисперсионным соотношением:

0.4

0

-0.8

¥. −0.4

$$m^{2} = k^{2} \left(\frac{N^{2}}{(\omega - kU^{2})} - 1 \right),$$
 (2)

где m, k — вертикальное и горизонтальное волновые числа; N — частота Вяйсяля—Брента; U — горизонтальная компонента термосферного ветра. Положительные значения m^2 соответствуют волнам, распространяющимся по вертикали, а отрицательные значения соответствуют затухающим волнам. Частотные характеристики волн, захватываемых в волновод Доплера, определяются скоростью ветра и горизонтальной компонентой волнового вектора. Выражение (2), полученное в предположении об изотермичности термосферы и независимости от высоты, где наблюдается ветер, применяется для качественного анализа результатов расчетов и интерпретации физических процессов.

На рисунке 6 волноводный характер возмущений проявляется на высотах ниже ~ 150 км и расстояниях ~500 км от эпицентра тропосферного источника. Отметим также, что пространственные масштабы возмущений в нижней термосфере существенно меньше масштабов возмущений на высотах более 200 км. На больших высотах воз-

ГЕОМАГНЕТИЗМ И АЭРОНОМИЯ том 62 № 4 2022

можно формирование волноводной области, обусловленной изменением температуры с высотой. Механизм формирования такой области и возможности изменения ее масштабов вследствие диссипации акустико-гравитационных волн с периодами, близкими к периодам Вяйсяля—Брента в термосфере, рассмотрен в работе [Карпов и Кшевецкий, 2014]. Влияние такого волновода, по-видимому, будет сказываться на характере распространения ВГВ, генерируемых тропосферным источником с периодом колебаний 15 мин и практически не будет оказывать влияния на волны, генерируемые источником колебаний с периодом 30 мин.

Волновые возмущения термосферы на высотах более 200 км, видимо, связаны с распространением волн вдоль волновода, обусловленного вертикальной структурой температуры. Влияние термосферного ветра в этой области высот проявляется в возрастании амплитуд волн, распространяющихся против ветра, и уменьшении их горизонтальной длины волны. Амплитуды волн, распространяющихся в направлении ветра, уменьшаются, а их горизонтальная длина увеличивается. При этом асимметрия в характеристиках возмущений, распространяющихся против термосферного ветра и по направлению ветра, качественно объясняется соотношением (2). Так для волн, распространяющихся против ветра, величина m^2 будет уменьшаться и может стать отрицательной. Это будет соответствовать затуханию волн в вертикальном направлении. Оценки вели-



Рис. 5. Распределение волновой добавки к температуре через 2 ч после начала расчета при действии тропосферного источника тепла для безветренной атмосферы и с учетом нейтрального ветра с периодом T = 30 мин (a, δ) и T = 15 мин (a, c) соответственно. Центр источника по оси ОХ находится в точке x = 1000 км. Стрелкой обозначено направление ветра.



Рис. 6. Разность между вариациями температуры с учетом ветра и без учета ветра через 2 ч после начала расчета при действии тропосферного источника тепла с периодом T = 30 мин (верхняя панель) и T = 15 мин (нижняя панель).

чины m^2 по данным на рис. 4 показывают, что для таких волн реализуется режим затухания. Для волн, распространяющихся в направлении ветра, сохраняется режим распространения по вертикали. Как видно из рис. 6, вертикальный размер области волн, распространяющихся против ветра, меньше, чем размер области для волн, распространяющихся по ветру. Из соотношения (2) также следует, что термосферный ветер в большей мере будет влиять на распространение мелко- и среднемасштабных волн с небольшими, в сравнении со скоростью ветра, фазовыми скоростями.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты численных экспериментов показывают, что ВГВ, возбуждаемые тепловыми источниками в тропосфере, достигают высот термосферы и существенно влияют на пространственные и временные вариации атмосферных параметров. Волновые возмущения в термосфере возникают достаточно быстро (в течение 30 мин). Это обусловлено распространением и диссипацией в термосфере инфразвуковых волн, которые генерируются совместно с ВГВ тепловыми тропосферными источниками. Существенное влияние на пространственно-временную структуру волновых возмущений термосферы оказывает термосферный ветер. Это влияние проявляется в следующем.

1. Распространение волн с малыми пространственными масштабами (менее 100 км) на высотах менее 150 км носит волноводный характер. Возникновение такого волновода определяется вертикальной структурой ветра в нижней термосфере.

2. В верхней термосфере отмечается повышение амплитуд и уменьшение пространственных масштабов волн, распространяющихся против термосферного ветра. Для волн, распространяющихся в направлении термосферного ветра, отмечается понижение амплитуд и увеличение пространственных масштабов.

5. ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке стипендии Президента Российской Федерации для молодых ученых и аспирантов СП-753.2021.3 (Курдяева Ю.А: Численные расчеты, анализ интерпретация результатов), гранта Российского фонда фундаментальных исследований и Калининградской области № 18-35-00121 (Карпов М.И.: Анализ интерпретация результатов) и гранта Российского научного фонда № 21-17-00208 (Борчевкина О.П.: Подготовка данных для моделирования).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

– Ахмедов Р.Р., Куницын В.Е. Моделирование ионосферных возмущений, вызванных землетрясениями и взрывами // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 44. № 1. С. 105–112. 2004.

– Борчевкина О.П., Карпов И.В. Ионосферные неоднородности в периоды метеорологических возмущений // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 57. № 5. С. 670–675. 2017.

— Гаврилов Н.М., Коваль А.В. Параметризация воздействия мезомасштабных стационарных орографических волн для использования в численных моделях динамики атмосферы // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 49. № 3. С. 271–278. 2013.

– Карпов И.В., Кшевецкий С.П. Механизм формирования крупномасштабных возмущений в верхней атмосфере от источников АГВ на поверхности Земли // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 54. № 4. С. 553–562. 2014. – Кшевецкий С.П., Гаврилов Н.М. Вертикальное распространение нелинейных гравитационных волн и их разрушение в атмосфере // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 43. № 1. С. 74–82. 2003.

– Кшевецкий С.П., Куличков С.Н. Влияние внутренних гравитационных волн от конвективных облаков на атмосферное давление и пространственное распределение возмущений температуры // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 51. № 1. С. 52–59. 2015.

- Blanc E., Farges T., Le Pichon A. et al. Ten year observations of gravity waves from thunderstorms in western Africa // J. Geophys. Res. Atmos. V. 119. P. 6409–6418. 2014.

- Borchevkina O., Karpov I., Karpov M. Meteorological storm influence on the ionosphere parameters // Atmosphere. V. 11. N 9.1017. 2020.

https://doi.org/10.3390/atmos11091017

– Boška J., Šauli P. Observations of gravity waves of meteorological origin in the F-region ionosphere // Phys. Chem. Earth. V. 26. P. 425–428. 2001.

https://doi.org/10.1016/S1464-1917(01)00024-1

- *Dong W., Hickey M. P., Zhang S.* A numerical study of gravity waves propagation characteristics in the mesospheric Doppler duct // J. Geophys. Res. Atmos. 126. e2021-JD034680. 2021.

https://doi.org/10.1029/2021JD034680

- Drob D.P., Emmert J.T., Meriwether J.W. et al. An update to the Horizontal Wind Model (HWM): The quiet time thermosphere // Earth and Space Science. V. 2. P. 301– 319. 2015.

− Drobzheva Ya.V., Krasnov V.M., The acoustic field in the atmosphere and ionosphere caused by a point explosion on the ground // J. Atmos. Sol.-Terr. Phy. V. 65. № 3. P. 369–377. 2003.

- *Fritts D.C.* A review of gravity wave saturation processes, effects, and variability in the middle atmosphere // Pure Appl. Geophys. V. 130. P. 343–371. 1989.

- Fritts D.C., Alexander M.J. Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere // Rev. Geophys. V. 41. N_{2} 1. P. 1-64. 2003.

https://doi.org/10.1029/2001RG000106

- Hickey M.P., Schubert G., Walterscheid R.L. Acoustic wave heating of the thermosphere // J. Geophys. Res. -Space. V. 106(A10). P. 21543–21548. 2001. https://doi.org/10.1029/2001JA000036

- Holton J. R. An Introduction to dynamic meteorology. Fourth edition. London, UK: Elsevier Academic Press. 535 p. 2004.

- Karpov I., Kshevetskii S. 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. Sol.-Terr. Phys. V. 164. P. 89–96. 2017.

– Kshevetskii S.P. Analytical and numerical investigation of nonlinear internal gravity waves // Nonlinear Proc. Geoph. V. 8. P. 37–53. 2001a.

– Kshevetskii S.P. Modeling of propagation of internal gravity waves in gases // Comp. Math. Math. Phys. V. 41. № 2. P. 273–288. 2001b.

– Kshevetskii S.P. Numerical simulation of nonlinear internal gravity waves // Comp. Math. Math. Phys. V. 41. P. 1777–1791. 2001c. - *Kurdyaeva Y., Kshevetskii S.* Study of propagation of acoustic-gravity waves generated by tropospheric heat source // EGU General Assembly 2021. EGU21-2755. 2021.

https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-2755

– Li W., Yue J., Yang Y. et al. Analysis of ionospheric disturbances associated with powerful cyclones in East Asia and North America // J. Atmos. Sol.-Terr. Phy. V. 161. P. 43–54. 2017.

https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.06.012

- Lindzen R.S. Turbulence and stress owing to gravity wave and tidal breakdown // J. Geophys. Res. V. 86. P. 9707-9714. 1981.

- Martinis C.R., Manzano J.R. The influence of active meteorological systems on the ionospheric F-region // Ann. Geophys. V. 42. № 1. 1999. https://doi.org/10.4401/ag-3708 - 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.-Space. V. 122(7). P. 7567. 2017.

– Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P. et al. NRLMSISE-00 Empirical model of the atmosphere: statistical comparisons and scientific issues // J. Geophys. Res. V. 107. № A12. P. 1468. 2002.

https://doi.org/10.1029/2002JA009430

– Polyakova A.S., Perevalova N.P. Comparative analysis of TEC disturbances over tropical cyclone zones in the northwest Pacific Ocean // Adv. Space Res. V. 52. № 8. P. 1416–1426. 2013.

https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.07.029

- Waldock J.A., Jones T.B. HF Doppler observations of medium-scale travelling ionospheric disturbances at mid-latitudes // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. V. 48(3). P. 245–260. 1986.