

Исследование сезонных вариаций ионосферной возмущенности по данным GPS/ГЛОНАСС над регионами Восточной Сибири и Дальнего Востока

А.С. Ясюкевич, М.А. Черниговская, А.А. Мыльникова, Б.Г. Шпынев, Д.С. Хабитуев

*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия
E-mail: annpol@iszf.irk.ru*

Выполнено исследование ионосферной возмущенности на основе анализа вариаций вертикального полного электронного содержания (ПЭС) над регионами Восточной Сибири и Дальнего Востока за период 2002–2015 гг. Данные ПЭС получены по измерениям фазовых двухчастотных приемников GPS/ГЛОНАСС. Ионосферная возмущенность изучалась на основе анализа коэффициента вариаций ПЭС в дневное время, представляющего собой нормированную дисперсию ПЭС и отражающего активность внутренних гравитационных волн (ВГВ) в ионосфере. Проанализированы сезонные вариации волновой возмущенности ионосферы и вариации, связанные с изменениями гелио-геомагнитной активности. Выявлены существенные изменения коэффициента вариаций ПЭС в течение года. Наименьшие значения коэффициента вариаций ПЭС на всех станциях наблюдаются в летние месяцы. Максимальный уровень вариаций ПЭС регистрируется в зимние периоды и до шести раз превышает уровень ВГВ-активности летом. Данные вариации наблюдаются регулярно, из года в год, и не связаны с изменениями гелио-геофизической обстановки. Предполагается, что анализируемые вариации параметров ионосферы вызваны ВГВ, распространяющимися в термосферу из нижележащей атмосферы. Эти среднemasштабные волновые возмущения генерируются в пространственно неоднородных, высокоскоростных струйных течениях, ассоциированных с зимними циркумполярными вихрями. Анализ данных архива ECMWF Era-Interim показал существенное повышение волновой активности на высотах стратосферы/нижней мезосферы с ноября по февраль всех анализируемых лет. Распространяясь вверх, волновые возмущения осуществляют вертикальный перенос компонентов атмосферы в мезосферу и нижнюю термосферу. Это приводит к изменениям баланса $[O]/[N_2]$ и вызывает, как следствие, вариации ионосферных параметров.

Ключевые слова: средняя и верхняя атмосфера, ионосфера, взаимодействие слоев атмосферы, волновые возмущения, ПЭС, GPS, ГЛОНАСС

*Одобрена к печати: 25.05.2017
DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-249-262*

Введение

Ионосфера является ионизованной областью земной атмосферы, подверженной воздействию как сверху — солнечное электромагнитное и корпускулярное излучение, магнитосферное воздействие, так и снизу — со стороны нижележащих слоев нижней и средней атмосферы. Известно, что определяющим фактором в термодинамическом режиме ионосферы является гелио-геомагнитная активность (Buonsanto, 1999; Dudok de Wit, Watermann, 2010). Во время гелио-геомагнитных возмущений (солнечные вспышки, геомагнитные бури) в ионосфере наблюдаются перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ): крупномасштабные (скорости ~400–1000 м/с, периоды от 30 мин до нескольких часов, горизонтальные длины волн — более тысячи километров) и среднemasштабные (скорости менее 300 м/с, периоды ~15–60 мин, горизонтальные длины волн — несколько сотен километров). Основными источниками ПИВ в периоды повышенной гелио-геомагнитной активности являются внутренние гравитационные волны (ВГВ), генерируемые в авроральных зонах и распространяющиеся из полярной шапки к экватору (Afraimovich et al., 2013; Ding et al., 2008; Hocke, Schlegel, 1996; Hunsucker, 1982).

В то же время большое количество экспериментальных и теоретических исследований свидетельствуют, что во многих случаях причиной наблюдаемых вариаций ионосферных

параметров являются атмосферные волны различных пространственно-временных масштабов (акустические, внутренние гравитационные, приливные и планетарные), распространяющиеся из нижней и средней атмосферы и при определенных условиях проникающие на высоту ионосферы (Hocke, Schlegel, 1996; Laštovička, 2006; Vadas, 2007; Vincent, 2009; Yiğit, Medvedev, 2015).

В обзорных работах (Fritts, Alexander, 2003; Tsuda, 2014; Vincent, 2009; Yiğit, Medvedev, 2015) подчеркнута, что ВГВ, генерируемые метеорологическими возмущениями в нижней и средней атмосфере, вносят существенный вклад в вариации термодинамического режима и состава средней атмосферы и обеспечивают, таким образом, вертикальное взаимодействие атмосферных слоев. В атмосфере могут существовать как мелкомасштабные ВГВ с короткими периодами и малыми длинами волн по горизонтали и вертикали, так и средние и крупномасштабные ВГВ, имеющие горизонтальную длину волны от нескольких десятков до нескольких тысяч километров. Периоды этих волн на средних широтах могут варьироваться от нескольких минут до почти суток (Fritts, Alexander, 2003; Tsuda, 2014).

Циркумполярные вихри (ЦПВ) и связанные с ними струйные течения (СТ), формирующиеся в зимней нейтральной атмосфере высоких и средних широт на высотах стратосферы/нижней мезосферы, являются источником ВГВ (Шпынев, Черниговская, Хабитуев, 2016; Gerrard, Bhattacharya, Thayer, 2011; Frissell et al., 2016; Whiteway et al., 1997; Wu, Waters, 1996; Shpynev, Churilov, Chernigovskaya, 2015). Распространяясь вверх, эти волны вызывают вертикальный перенос нейтральных компонентов атмосферы в мезосферу и нижнюю термосферу и, как следствие, затем проявляются в вариациях электронной концентрации на ионосферных высотах.

Результаты исследований, направленных на выявление эффектов СТ в вариациях параметров ионосферы по данным дигизондов в среднеширотном Иркутске и высокоширотном Норильске для 2008–2010 гг., приведены в работах (Черниговская, Ратовский, Шпынев, 2015; Chernigovskaya, Shpynev, Ratovsky, 2015; Chernigovskaya et al., 2015). Авторы статей (Шпынев и др., 2016; Shpynev et al., 2015) по данным распределенной цепи среднеширотных и субполярных ионозондов выявили региональные особенности реакции ионосферы на высотах F_2 -слоя, связанные с развитием и трансформацией в течение зимы ЦПВ на высотах страто-мезосферы.

Целью настоящей работы является исследование высокочастотной (с периодами до нескольких часов) ионосферной возмущенности на основе данных о вариациях вертикального полного электронного содержания (ПЭС) над регионами Восточной Сибири и Дальнего Востока за четырнадцатилетний период 2002–2015 гг. и выявление возможного вклада эффектов зимних стратосферных струйных течений в уровень возмущенности ПЭС.

Данные измерений и методы их анализа

Данные ПЭС получены по измерениям фазовых двухчастотных приемников GPS/ГЛОНАСС международной сети IGS (Dow, Neilan, Rizos, 2009), расположенных

в среднеширотном (Иркутск), субавроральном (Якутск) и высокоширотном (Норильск и Тикси) регионах (табл. 1). Разделение ионосферы на широтные зоны, имеющие существенно разные свойства в зависимости от геомагнитной широты, принято в соответствии с классификацией (Hunsucker, Hargreaves, 2003): низкоширотная ($Glat < 30^\circ$), среднеширотная ($30^\circ < Glat < 60^\circ$) и высокоширотная ($Glat > 60^\circ$) зоны. Следуя этой классификации, регион Иркутска является типично среднеширотным, регионы Норильска и Тикси — высокоширотными, Якутск же расположен в субавроральной зоне. Субавроральная ионосфера над Якутском в невозмущенных условиях проявляет свойства среднеширотной ионосферы, а в возмущенные периоды обладает всеми особенностями высокоширотной ионосферы.

Таблица 1. Сведения о расположении используемых приемников GPS/ГЛОНАСС

Название приемника	Расположение	Географические координаты	Геомагнитные координаты
IRKJ	Иркутск	52,22° с.ш., 104,32° в.д.	42° N Glat, 177° E Glon
YAKT	Якутск	62,03° с.ш., 129,68° в.д.	52° N Glat, 196° E Glon
NRIL	Норильск	69,36° с.ш., 88,36° в.д.	60° N Glat, 166° E Glon
TIXI	Тикси	71,63° с.ш., 128,87° в.д.	66° N Glat, 198° E Glon

Из исходных данных рассчитывались ряды «вертикального» ПЭС I_V по методике, подробно описанной в работе (Yasyukevich, Mylnikova, Polyakova, 2015). Используемая модель ПЭС представляет собой разложение вертикального ПЭС ТЕС $I_V(\varphi, l, t)$ в ряд Тейлора второго порядка в точке над станцией с координатами (φ_0, l_0) :

$$I_M = S_j^i \left[I_V(\varphi_0, l_0, t_0) + G_\varphi \Delta\varphi_j^i + G_{q_\varphi} (\Delta\varphi_j^i)^2 + G_l \Delta l_j^i + G_{q_l} (\Delta l_j^i)^2 + G_t \Delta t_j^i + G_{q_t} (\Delta t_j^i)^2 \right] + I_{DCB,j}, \quad (1)$$

где $G_{\varphi,l} = \partial I_V / \partial \varphi, l$, $G_{q_\varphi,l} = \partial^2 I_V / \partial \varphi^2, l^2$ — линейные и квадратичные пространственные градиенты ПЭС; $G_t = \partial I_V / \partial t$ и $G_{q_t} = \partial^2 I_V / \partial t^2$ — первая и вторая производная по времени. Смешанными производными пренебрегается; I_{DCB} — это вклад дифференциальных кодовых задержек в ПЭС; S_j^i — наклонный фактор. Достоинством данной методики является то, что она позволяет получать длительные ряды «вертикального» ПЭС с корректным учетом дифференциальных кодовых задержек.

В качестве показателя, характеризующего уровень ионосферной возмущенности, выбран коэффициент вариаций $vrTEC$, представляющий собой нормированную дисперсию ПЭС в дневное время:

$$vrTEC = \frac{\sqrt{\langle (TEC - \langle TEC \rangle)^2 \rangle}}{\langle TEC \rangle} \times 100\%, \quad (2)$$

где $\langle TEC \rangle$ — усреднение ПЭС, которое проводится на временном интервале 14–18 LT. Из выражения (2) следует, что коэффициент $vrTEC$ пропорционален вариациям ПЭС в диапазоне периодов T , не превышающих период усреднения. В нашем случае изменения коэффициента $vrTEC$ описывают высокочастотные вариации ПЭС с периодом $T < 4$ ч. Источником вариаций параметров ионосферы с периодами несколько часов в основном являются ПИВ, связанные с распространением ВГВ. Таким образом, коэффициент $vrTEC$ отражает уровень ВГВ-возмущенности в ионосфере.

Результаты анализа и их обсуждение

На *рис. 1б–д* показаны временные вариации коэффициента вариаций $vrTEC$ на четырех станциях за период 2002–2015 гг. (толстой линией нанесено 27-дневное скользящее среднее \overline{vrTEC}). Видно, что коэффициент $vrTEC$ испытывает существенные внутригодовые изменения. Наименьший уровень ВГВ-возмущенности наблюдается на всех станциях в летние месяцы со значениями $vrTEC \sim 5\text{--}10\%$. Максимальные значения $vrTEC$ регистрируются в зимние периоды с превышением до 5–6 раз летнего уровня. Такой сезонный ход коэффициента вариаций $vrTEC$ наблюдается регулярно, из года в год, на всех анализируемых станциях. При этом зимой максимальные усредненные значения коэффициента \overline{vrTEC} на высокоширотных станциях NRIL, TIXI ($\sim 35\text{--}45\%$) превышают максимальные усредненные значения коэффициента на субавроральной станции YAKT и на среднеширотной станции IRKJ ($\sim 30\%$). Одиночные всплески в распределениях коэффициента вариаций $vrTEC$ отражают отдельные крупные геомагнитные события, либо связаны со сбоями определения ПЭС.

Вариации ВГВ-возмущенности ионосферы в цикле солнечной активности

Как подчеркнуто выше, термодинамическое состояние ионосферы определяется главным образом уровнем гелио-геомагнитной активности. Поэтому для разделения источников регистрируемых ионосферных возмущений при анализе учитывалась текущая гелио-геомагнитная обстановка (*рис. 1а*). Анализируемые 2002–2015 гг. охватывают временной интервал между максимумами 23-го и 24-го циклов солнечной активности. Особенностью перехода 23/24-го солнечных циклов был очень продолжительный период экстремально низкой солнечной активности. Этот минимум фактически начался в 2006 г. и продолжался до начала 2010 г. (Russell, Luhmann, Jian, 2010).

Во время гелио-геомагнитных возмущений в ионосфере наблюдаются крупно- и среднемасштабные ПИВ, источником которых являются ВГВ, генерируемые в высоких широтах и распространяющиеся к экватору (Afraimovich et al., 2013; Ding et al., 2008; Hocke, Schlegel, 1996; Hunsucker, 1982). На *рис. 1* видно, что повышение гелио-геомагнитной

активности проявляется в межсуточных вариациях $vrTEC$ синхронным увеличением на 20–30% ВГВ-активности на всех станциях наблюдения (как например, буря в октябре 2003 г.).

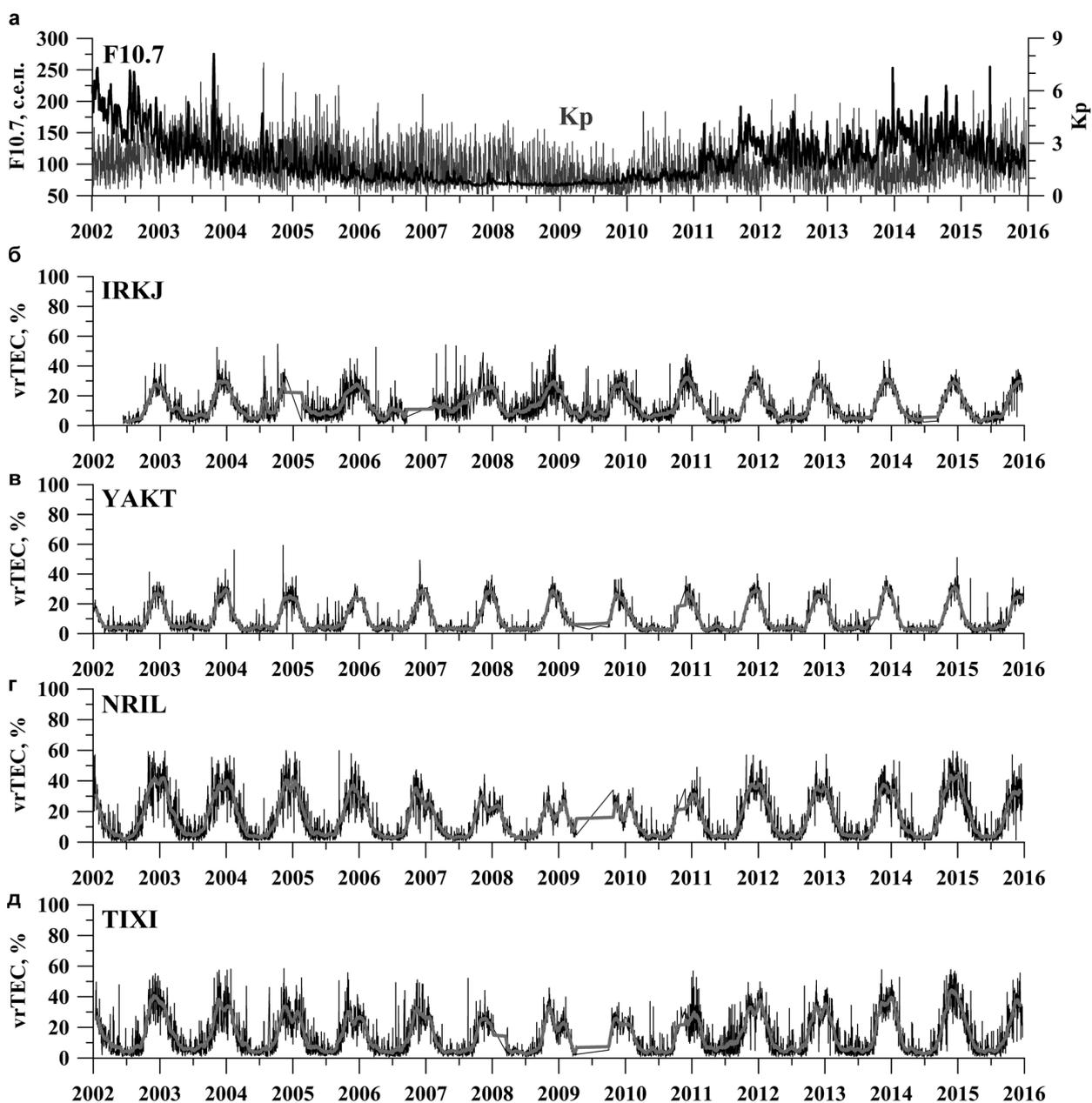


Рис. 1. Временные изменения индексов гелио-геомагнитной активности $F_{10.7}$ и K_p (а) и коэффициентов вариаций ПЭС $vrTEC$ (черный) и их усредненных скользящим средним по 27 дням (серый) над Иркутском (б), Якутском (в), Норильском (г) и Тикси (д) в дневное время для периода 2002–2015 гг.

На рис. 1 также прослеживается зависимость уровня ВГВ-возмущенности ионосферы от солнечной активности в зимние сезоны. Наблюдается снижение до 40% зимних максимальных усредненных значений коэффициента вариаций $vrTEC$ в годы минимума солнечной активности, более выраженное на высокоширотных станциях Норильск и Тикси (рис. 1г, д). При этом уровень возмущенности в летние месяцы не изменяется.

Регулярно действующим источником ВГВ в атмосфере и ионосфере является солнечный терминатор. Эффекты его воздействия стабильны и регулярно повторяемы. По результатам исследований (Едемский, Воейков, Ясюкевич, 2011), распределение числа волновых пакетов, связанных с прохождением утреннего и вечернего солнечного терминатора в ионосфере, меняется в течение года. В зимний период наибольшее число волновых пакетов регистрируется в течение 4–8 ч после прохождения утреннего терминатора. В летнее время, напротив, максимальное число волновых пакетов наблюдается за час до вечернего терминатора. Таким образом, выбранный нами для расчета коэффициента вариаций ПЭС по формуле (2) период усреднения позволяет избежать вклада эффектов терминатора в *vrTEC* как в зимний, так и в летний сезоны. Отметим также, что согласно статистике, приведенной в статье (Afraimovich et al., 2009a), общее число и интенсивность волновых пакетов, вызванных прохождением терминатора в ионосфере, в летнее время существенно выше, чем в зимнее, что не совпадает с ходом рассматриваемых нами сезонных вариаций *vrTEC*. Отметим также, что вызываемые солнечным терминатором возмущения имеют магнитогидродинамическую природу и связаны с прохождением терминатора в магнитосопреженной области (Afraimovich et al., 2009b), при этом эффект максимален для внутренних магнитных оболочек с $L \leq 3$. Поэтому для полярных и субавроральных регионов эффекты солнечного терминатора в ионосфере должны быть менее выражены, чем для среднеширотных, что также противоречит выявленным особенностям сезонных вариаций коэффициента *vrTEC*. Таким образом, можно сделать вывод, что наблюдаемые нами сезонные вариации уровня высокочастотной возмущенности ПЭС не связаны с ионосферными эффектами солнечного терминатора.

*Вариации ВГВ-возмущенности ионосферы, связанные с влиянием процессов
в нижележащей атмосфере*

Регулярно наблюдаемые существенные сезонные вариации коэффициента *vrTEC* с максимумом зимой и минимумом летом, очевидно, имеют источник, не связанный с вкладом гелио-геомагнитной активности в высокочастотную составляющую ионосферной возмущенности. На *рис. 1а* видно, что в вариациях индекса геомагнитной активности K_p подобные сезонные вариации не прослеживаются, хотя возможна некоторая сезонная зависимость эффективности влияния геомагнитной активности на состояние ионосферы в дневное время.

Характер сезонных изменений коэффициента вариаций ПЭС (*рис. 1б–д*) полностью идентичен вариациям высокочастотной составляющей изменчивости в максимуме электронной концентрации F_2 -слоя ($N_m F_2$) в диапазоне периода от 0,5 до 4 ч, полученным по данным ионозондов DPS-4 в Иркутске и Норильске для периода минимума солнечной

активности в 2008–2010 гг. (Черниговская, Ратовский, Шпынев, 2015; Chernigovskaya, Shpynev, Ratovsky, 2015; Chernigovskaya et al., 2015). Для обеих станций коэффициент вариаций vrN_mF_2 в дневное время был максимален зимой и минимален летом (рис. 2). При этом для Норильска разница зима-лето была существенно выше, чем для Иркутска.

Следует отметить, что значения уровня возмущенности в ПЭС $vrTEC$ в зимнее время (рис. 1б, г) существенно выше, чем в максимуме электронной концентрации vrN_mF_2 (рис. 2) как для среднеширотного Иркутска, так и для высокоширотного Норильска. Эта разница уровней возмущенности в ПЭС и N_mF_2 связана с тем, что ПЭС по определению представляет собой интеграл электронной концентрации, а как следствие, и ее вариации вдоль всей толщи атмосферы. Таким образом, величина высокочастотной возмущенности в ПЭС включает в себя как возмущения в максимуме электронной концентрации F_2 -слоя, так и в нижележащих слоях ионосферы, где интенсивность вариаций, связанных с активностью распространяющихся из страто-мезосферы ВГВ, также может быть высокой.

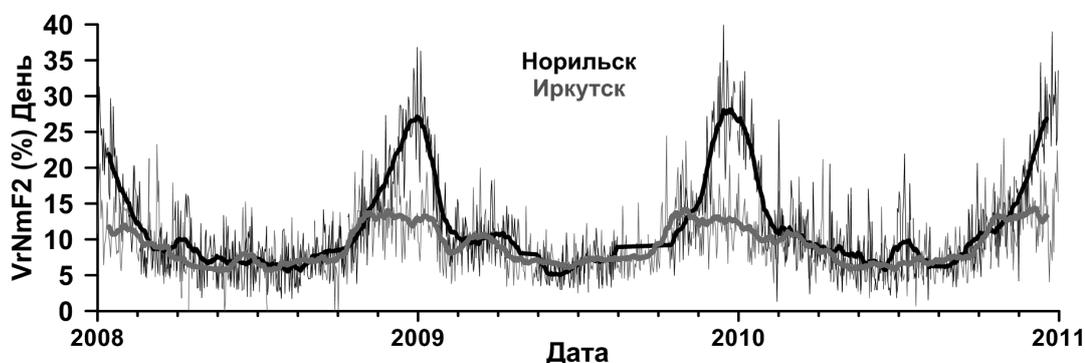


Рис. 2. Временные изменения коэффициента вариаций максимума электронной концентрации F_2 -слоя ионосферы vrN_mF_2 , усредненные скользящим средним по 27 дням, над Иркутском и Норильском в 2008–2010 гг. (Черниговская, Ратовский, Шпынев, 2015)

Ярко выраженная сезонная зависимость ВГВ-возмущенности как в максимуме электронной концентрации ионосферы (vrN_mF_2), так и в ПЭС ($vrTEC$), связана, на наш взгляд, с влиянием процессов, происходящих в нижележащих слоях атмосферы (мезосфере, стратосфере). На основе анализа данных архива ECMWF ERA-Interim (<http://www.ecmwf.int/en/research/climate-reanalysis/era-interim>) выявлено существенное повышение волновой активности на высотах стратосферы / нижней мезосферы с ноября по февраль для всех анализируемых лет (Черниговская, Ратовский, Шпынев, 2015; Chernigovskaya, Shpynev, Ratovsky, 2015; Chernigovskaya et al., 2015). Источник генерации среднемасштабных волн на высотах страто-мезосферы в средне- и высокоширотной атмосфере в зимний сезон связан с развитием сдвиговых неустойчивостей в пространственно неоднородном, высокоскоростном струйном течении, ассоциированном с зимним ЦПВ (Shpynev, Churilov, Chernigovskaya, 2015).

Анализ пространственно-временных вариаций скоростей горизонтального и вертикального движения атмосферного газа на высотах страто-мезосферы на основе данных ECMWF ERA-Interim позволил определить пространственные размеры наблюдаемых

волновых возмущений: горизонтальная длина волны могла изменяться в широких пределах — $\lambda_h = 300\text{--}3000$ км, вертикальная длина волны — $\lambda_z = 5\text{--}10$ км. Таким образом, с учетом этих параметров можно оценить, что типичные периоды наблюдаемых на высотах страто-мезосферы волновых возмущений могут составлять величину $T = 50\text{--}250$ мин, т.е. периоды ВГВ (Шпынев, Черниговская, Хабитуев, 2016). Рассмотрение спектральных характеристик ВГВ, генерируемых зимним СТ на высотах стратосферы / нижней мезосферы, позволил выделить два типа волновых возмущений. Первый связан с регулярной генерацией волн сдвиговой неустойчивостью на границе зимних СТ (рис. 3а). Второй тип наблюдался в зимней стратосфере / нижней мезосфере во время событий внезапных стратосферных потеплений, когда структура ЦПВ кардинально менялась (рис. 3б).

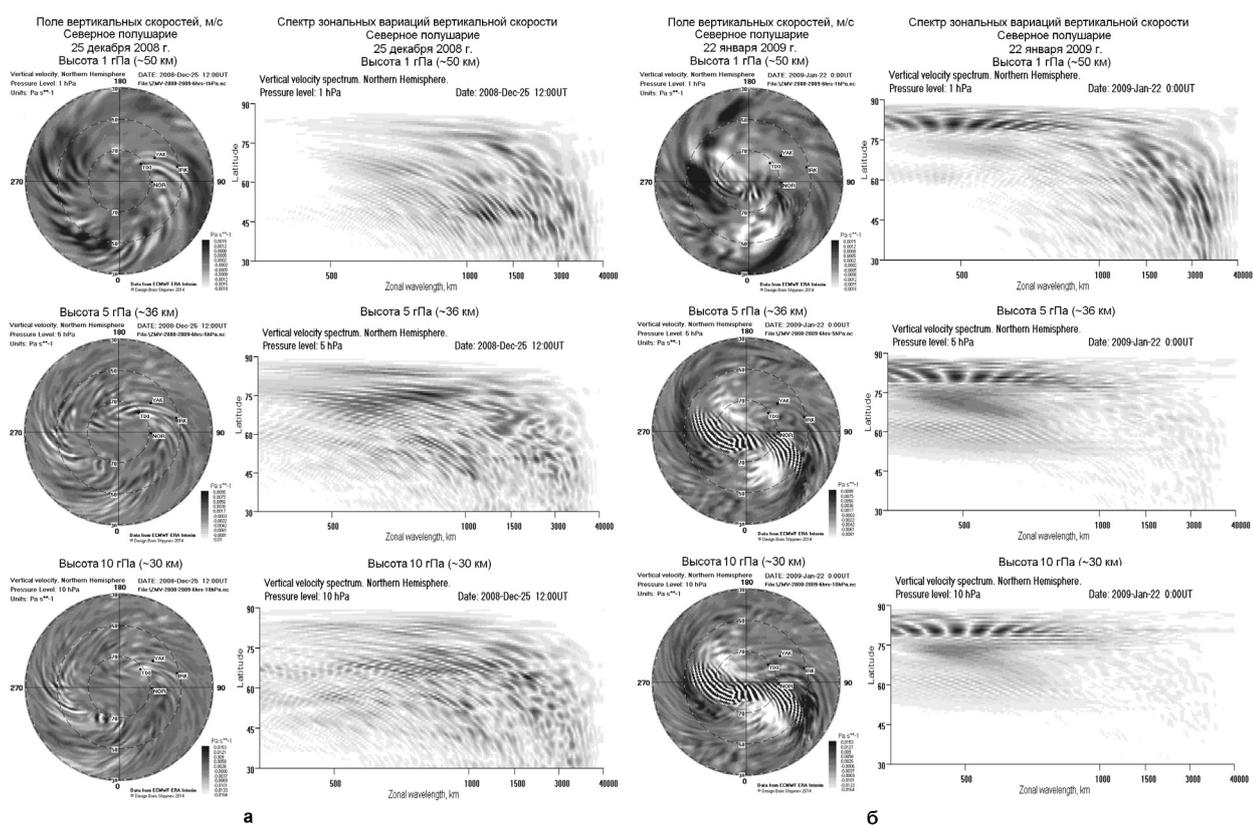


Рис. 3. Вариации вертикальных скоростей и спектры зональных вариаций вертикальной скорости на высотах стратосферы 10 гПа (~30 км), 5 гПа (~36 км) и нижней мезосферы 1 гПа (~50 км) для 25.12.2008 — условия невозмущенного ЦПВ (а) и для 22.01.2009 — условия возмущенного ЦПВ (б)

При обсуждении особенностей реакции ионосферы на распространение снизу атмосферных возмущений необходимо учитывать регулярные (фоновые) региональные особенности характеристик ионосферы над станциями, находящимися в различных широтных зонах (Mukhtarov et al., 2013; Ratovsky et al., 2014). Однако учет региональных особенностей регулярных вариаций ПЭС не позволяет объяснить общий характер сезонной зависимости ВГВ-возмущенности ионосферы во всех рассмотренных областях.

При схожести в целом характера сезонных вариаций коэффициента $vrTEC$ в период 2002–2015 гг. (рис. 1б–д), можно заметить проявления некоторых региональных

и локальных особенностей. Возможные причины наблюдаемых различий ионосферной возмущенности над анализируемыми станциями в зимние сезоны могли быть связаны с тем, что эти регионы находились под воздействием различных циркуляционных зон зимних стратосферных ЦПВ. Каждую зиму ЦПВ имели свою индивидуальную, трансформирующуюся структуру (сплющивались, смещались относительно полюса к средним широтам, делились на несколько вихрей циклонического и антициклонического типа) и характеризовались разными скоростями движения атмосферного газа (рис. 4). Особенно существенные трансформации стратосферного вихря происходили в периоды развития зимних внезапных стратосферных потеплений, когда направление зональной стратосферной циркуляции могло измениться с западного на восточное. В пограничных слоях пространственно неоднородных, высокоскоростных СТ, ассоциированных с зимними ЦПВ на высотах стратосферы / нижней мезосферы, развивались неустойчивости, которые генерировали среднemasштабные волновые движения, распространяющиеся вверх до высот термосферы и ионосферы. При этом изменялся баланс $[O]/[N_2]$, вызывая, как следствие, вариации параметров ионосферы (Gardner, Liu, 2010; Liou et al., 2005; Prölss, Werner, 2002).

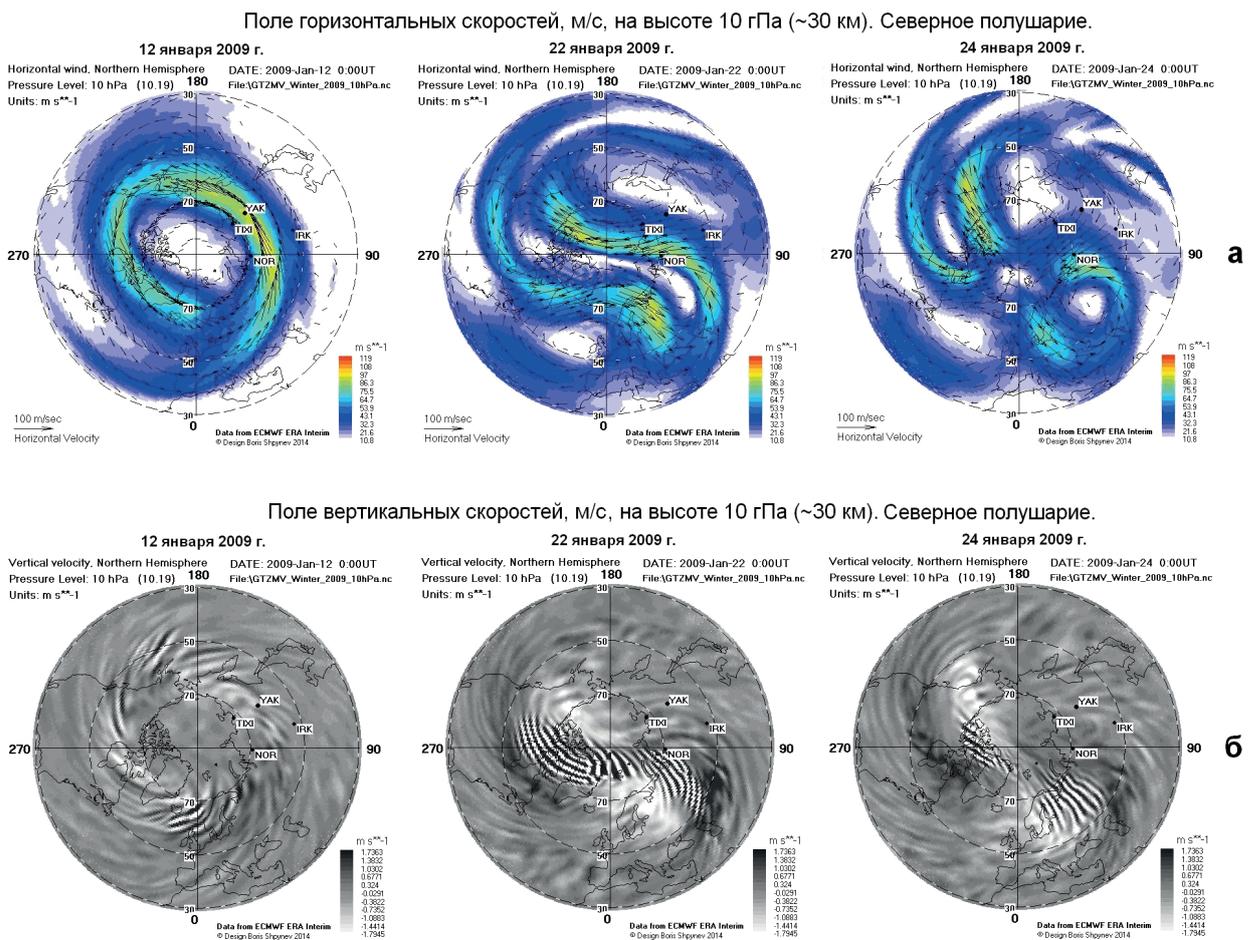


Рис. 4. Стратосферное СТ (поле горизонтальных скоростей, м/с) (а) и среднemasштабные волновые движения, связанные со СТ (поле вертикальных скоростей, м/с) (б) на высоте 10 гПа (~30 км) для 12, 22 и 24.01.2009 г.

Выводы

В результате проведенного анализа, направленного на исследование высокочастотной ионосферной возмущенности в вариациях вертикального полного электронного содержания над регионами Восточной Сибири и Дальнего Востока за период 2002–2015 гг., были сделаны следующие выводы.

1. Прослеживается четкая сезонная зависимость возмущенности ПЭС от периодов ВГВ для всех анализируемых станций, которая не связана с изменениями гелио-геофизических условий. Самый высокий уровень ВГВ-изменчивости ионосферы наблюдается зимой, самый низкий — летом. Разница лето-зима составляет ~30–40% и наиболее выражена для высокоширотных станций Норильск, Тикси.

2. Периоды повышенной ВГВ-изменчивости ионосферы над регионами Восточной Сибири и Дальнего Востока в зимний период совпадают с периодами усиления волновой активности в нижележащей атмосфере, выявленными на основе анализа пространственно-временных вариаций скоростей горизонтального и вертикального движения атмосферного газа на высотах стратосферы / нижней мезосферы по данным ECMWF ERA-Interim с ноября по февраль всех анализируемых лет. Источники генерации волновых возмущений с периодами ВГВ в страто-мезосфере могут быть связаны с развитием сдвиговых неустойчивостей в пространственно неоднородных, высокоскоростных струйных течениях, образующихся на границах зимнего циркумполярного вихря.

3. Причины, по которым значения коэффициента вариаций ПЭС над анализируемыми станциями, расположенными в различных географических регионах, существенно отличаются в одинаковых гелио-геомагнитных условиях, могут быть связаны с тем, что эти станции расположены под зонами различной страто-мезосферной циркуляции (циклонический или антициклонический вихри, области границ струйных течений) в циркумполярных вихрях, трансформирующихся в течение зимнего периода.

4. Распространяющиеся вверх волновые возмущения осуществляют перенос атмосферных составляющих из мезосферы в нижнюю термосферу. Изменения в нейтральном составе ведут к изменениям отношения $[O]/[N_2]$ и, как следствие, к вариациям ионосферных параметров в верхней атмосфере.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 15-05-05227 и 16-35-60018), а также в рамках гранта Президента РФ государственной поддержки ведущих научных школ РФ № НШ-6894.2016.5. Экспериментальные данные частично получены с использованием оборудования ЦКП «Ангара» (ИСЗФ СО РАН).

Литература

1. *Едемский И.К., Воейков С.В., Ясюкевич Ю.В.* Сезонные и широтные вариации параметров волновых возмущений МГД-природы, генерируемых солнечным терминатором // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 4. С. 107–116.
2. *Черниговская М.А., Ратовский К.Г., Шпынев Б.Г.* Метеорологические эффекты ионосферной возмущенности над регионом Восточной Сибири по данным вертикального радиозондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 3. С. 39–48.
3. *Шпынев Б.Г., Черниговская М.А., Хабитуев Д.С.* Спектральные характеристики атмосферных волн, генерируемых зимним стратосферным струйным течением северного полушария // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 2. С. 120–131.
4. *Шпынев Б.Г., Черниговская М.А., Куркин В.И., Ратовский К.Г., Белинская А.Ю., Степанов А.Е., Бычков В.В., Григорьева С.А., Панченко В.А., Коренькова Н.А., Леценко В.С., Мелич Й.* Пространственные вариации параметров ионосферы северного полушария над зимними струйными течениями // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 4. С. 204–215.
5. *Afraimovich E.L., Astafyeva E.I., Demyanov V.V., Edemskiy I.K., Gavriilyuk N.S., Ishin A.B., Kosogorov E.A., Leonovich L.A., Lesyuta O.S., Palamartchouk K.S., Perevalova N.P., Polyakova A.S., Smolkov G.Y., Voeykov S.V., Yasyukevich Y.V., Zhivetiev I.V.* A review of GPS/GLONASS studies of the ionospheric response to natural and anthropogenic processes and phenomena // J. Space Weather and Space Climate. 2013. Vol. 3. P. A27-p19. DOI: 10.1051/swsc/2013049.
6. *Afraimovich E.L., Edemskiy I.K., Voeykov S.V., Yasyukevich Yu.V., Zhivetiev I.V.* (2009a) Spatio-temporal structure of the wave packets generated by the solar terminator // Advances in Space Research. 2009. Vol. 44. No. 7. P. 824–835. DOI: 10.1016/j.asr.2009.05.017.
7. *Afraimovich E.L., Edemskiy I.K., Leonovich A.S., Leonovich L.A., Voeykov S.V., Yasyukevich Y.V.* (2009b) The MHD nature of night-time MSTIDs excited by the solar terminator // Geophysical Research Letters. 2009. Vol. 36. No. 15. P. L15106. DOI: 10.1029/2009GL039803.36.
8. *Buonsanto M.J.* Ionospheric Storms — A Review // Space Science Reviews. 1999. Vol. 88. No. 3/4. P. 563–601. DOI: 10.1023/A:100510753263.
9. *Chernigovskaya M.A., Shpynev B.G., Ratovsky K.G.* Meteorological effects of ionospheric disturbances from vertical radio sounding data // J. Atmospheric and Terrestrial Physics. 2015. Vol. 136. P. 235–243. DOI: 10.1016/j.jastp.2015.07.006.
10. *Chernigovskaya M.A., Shpynev B.G., Ratovsky K.G., Stepanov A.E.* The Stratospheric Jet Stream Effects in the High-latitude Ionosphere According to Vertical Radio Sounding Data // PIERS Proc. Prague, Czech Republic, July 6–9, 2015. P. 2562–2566.
11. *Ding F., Wan W., Liu L., Afraimovich E.L., Voeykov S.V., Perevalova N.P.* A statistical study of large-scale traveling ionospheric disturbances observed by GPS TEC during major magnetic storms over the years 2003–2005 // J. Geophysical Research. 2008. Vol. 13. P. A00A01. DOI: 10.1029/2008JA013037.
12. *Dow J.M., Neilan R.E., Rizos C.* The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems // J. Geodesy. 2009. Vol. 83. P. 191–198. DOI: 10.1007/s00190-008-0300-3.
13. *Dudok De Wit T., Watermann J.* Solar forcing of the terrestrial atmosphere // Comptes Rendus Geoscience. 2010. Vol. 342. No. 4. P. 259–272.
14. *Frissell N.A., Baker J.B.H., Ruohoniemi J.M., Greenwald R.A., Gerrard A.J., Miller E.S., West M.L.* Sources and characteristics of medium-scale traveling ionospheric disturbances observed by high-frequency radars in the North American sector // J. Geophysical Research. Space Physics. 2016. Vol. 121. P. 3722–3739. DOI: 10.1002/2015JA022168.
15. *Fritts D.C., Alexander M.J.* Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere // Reviews Geophysics. 2003. Vol. 41. No. 1. P. 1003–1066. DOI: 10.1029/2001RG000106.
16. *Gardner C.S., Liu A.Z.* Wave-induced transport of atmospheric constituents and its effect on the mesospheric Na layer // J. Geophys. Res. 2010. Vol. 115. P. D20302. DOI: 10.1029/2010JD014140.
17. *Gerrard A.J., Bhattacharya Y., Thayer J.P.* Observations of in-situ generated gravity waves during a stratospheric temperature enhancement (STE) event // Atmospheric Chemistry and Physics. 2011. Vol. 11. No. 22. P. 11,913–11,917. DOI: 10.5194/acp-11-11913-2011.
18. *Hocke K., Schlegel K.* A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances 1982–1995 // Annales Geophysicae. 1996. Vol. 14. No. 5. P. 917–940.
19. *Hunsucker R.D.* Atmospheric gravity waves generated in the high-latitude ionosphere. A review // Reviews of Geophysics and Space Physics. 1982. Vol. 20. No. 2. P. 293–315.
20. *Hunsucker R.D., Hargreaves J.K.* The High-Latitude Ionosphere and Its Effects on Radio Propagation. N.Y.: Cambridge University Press, 2003. 617 p.
21. *Laštovička J.* Forcing of the ionosphere by waves from below // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2006. Vol. 68. P. 479–497.
22. *Liou K., Newell P.T., Anderson B.J., Zanetti L., Meng C.-I.* Neutral composition effects on ionospheric storms at middle and low latitudes // J. Geophysical Research. 2005. Vol. 110. P. A05309. DOI: 10.1029/2004JA010840.
23. *Mukhtarov P., Pancheva D., Andonov B., Pashova L.* Global TEC maps based on GNSS data: 1. Empirical background TEC model // J. Geophysical Research. Space Physics. 2013. Vol. 118. P. 4594–4608. DOI: 10.1002/jgra.50413.
24. *Prölss G.W., Werner S.* Vibrationally excited nitrogen and oxygen and the origin of negative ionospheric storms // J. Geophysical Research. 2002. Vol. 107. No. A2. P. 1016. DOI: 10.1029/2001JA900126.
25. *Ratovsky K.G., Shi J.K., Oinats A.V., Romanova E.B.* Comparative study of high-latitude, mid-latitude and low-latitude ionosphere on basis of local empirical models // Advances in Space Research. 2014. Vol. 54. No. 3. P. 509–516.

26. *Russell C.T., Luhmann J.G., Jian L.K.* How unprecedented a solar minimum? // *Reviews of Geophysics*. 2010. Vol. 48. P. RG2004. DOI: 10.1029/2009RG000316.
27. *Shpynev B.G., Churilov S.M., Chernigovskaya M.A.* Generation of waves by jet-stream instabilities in winter polar stratosphere/mesosphere // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2015. Vol. 136. P. 201–215. DOI: 10.1016/j.jastp.2015.07.005(a).
28. *Shpynev B.G., Kurkin V.I., Ratovsky K.G., Chernigovskaya M.A., Belinskaya A.Yu., Grigorieva S.A., Stepanov A.E., Bychkov V.V., Pancheva D., Mukhtarov P.* High-midlatitude ionosphere response to major stratospheric warming // *Earth, Planets and Space*. 2015. Vol. 67. article id. 18. DOI :10.1186/s40623-015-0187-1(b).
29. *Tsuda T.* Characteristics of atmospheric gravity waves observed using the MU (Middle and Upper atmosphere) radar and GPS (Global Positioning System) radio occultation // *Proc. Japan Academy. Series B*. 2014. Vol. 90. No. 1. P. 12–27.
30. *Vadas S.L.* Horizontal and vertical propagation of gravity waves in thermosphere from lower atmospheric and thermospheric sources // *J. Geophysical Research*. 2007. Vol. 112. P. A06305. DOI: 10.1029/2006JA011845.
31. *Vincent R.A.* Gravity wave coupling from below: A review // *Climate and Weather of the Sun-Earth System (CAWSES): Selected Papers from the 2007 Kyoto Symposium*. Tokyo: TERRAPUB, 2009. P. 279–293.
32. *Whiteway J.A., Duck T.J., Donovan D.P., Bird J.C., Pal S.R., Carswell A.I.* Measurements of gravity wave activity within and around the Arctic stratospheric vortex // *Geophysical Research Letters*. 1997. Vol. 24. No. 11. P. 1387–1390. DOI: 10.1029/97GL01322.
33. *Wu D.L., Waters J.W.* Satellite observations of atmospheric variances: A possible indication of gravity waves // *Geophysical Research Letters*. 1996. Vol. 23. No. 24. P. 3631–3634. DOI: 10.1029/96GL02907.
34. *Yasyukevich Yu.V., Mylnikova A.A., Polyakova A.S.* Estimating the total electron content absolute value from the GPS/GLONASS data // *Results in Physics*. 2015. Vol. 5. P. 32–33. DOI: 10.1016/j.rinp.2014.12.006.
35. *Yigit E., Medvedev A.S.* Internal waves coupling processes in Earth's atmosphere // *Advances in Space Research*. 2015. Vol. 55. P. 983-1003.

Studying the seasonal pattern of ionospheric variability over Eastern Siberia and Far East region from GPS/GLONASS data

A.S. Yasyukevich, M.A. Chernigovskaya, A.A. Mylnikova, B.G. Shpynev, D.S. Khabituev

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia
E-mail: annpol@iszf.irk.ru*

We studied ionospheric variability from analysis of vertical total electron content (TEC) variations over the Eastern Siberia and Far East regions during the 2002–2015 period. TEC data were obtained from the phase of dual-frequency GPS/GLONASS receivers. We used TEC variation coefficient which is a normalized TEC dispersion in daytime to describe the high-frequency part of ionospheric variability. This coefficient represents the level of internal gravity waves (IGW) activity in the ionosphere. Analysis of the variability changes with season and solar and geomagnetic activity has revealed significant deviations of the TEC variation coefficient throughout a year. The lowest coefficient values are registered at all stations in summer months. The maximum of TEC variability level exists in winter and it exceeds up to 6 times the summer time variations. These variations are regularly observed from year to year and not associated with helio- geophysical conditions changes. The considered ionospheric variations are assumed to be caused by IGW propagating into thermosphere from the lower atmosphere. These mesoscale wave-like disturbances are generated in the spatially inhomogeneous, high-speed jet streams associated with winter stratospheric circumpolar vortex (CPV). Based on ECMWF ERA-Interim reanalysis data we revealed a significant increase in wave activity at the strato-mesosphere heights from November to February for all the years considered. Mesoscale wave-like disturbances generated within a CPV area can be partly transmitted upward. Propagating upward IGWs transfer atmospheric constituents into the mesosphere and lower thermosphere. This leads to molecular gas inflow or outflow at these heights altering, as a result, the $[O]/[N_2]$ ratio and causing ionospheric variation.

Keywords: middle and high atmosphere, ionosphere, atmospheric layers interaction, wave disturbances, TEC, GPS, GLONASS

*Accepted: 25.05.2017
DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-249-262*

References

1. Edemskiy I.K., Voeykov S.V., Yasyukevich Yu.V., Sezonnnye i shirotnyye variatsii parametrov volnovykh vozmushchenii MGD-prirody, generiruemykh solnechnym terminatorom (Seasonal and latitudinal variations of parameters of MHD-nature wave packets, generated by solar terminator), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 4, pp. 107–116.
2. Chernigovskaya M.A., Ratovskiy K.G., Shpynev B.G., Meteorologicheskie efekty ionosfernoi vozmushchennosti nad regionom Vostochnoi Sibiri po dannym vertikal'nogo radiozondirovaniya (Meteorological effects of ionospheric disturbances over East Siberia region, according to vertical radio sounding data), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 3, pp. 39–48.
3. Shpynev B.G., Chernigovskaya M.A., Khabituiev D.S., Spektral'nye kharakteristiki atmosferykh voln, generiruemykh zimmim stratosfernym struinym techeniem severnogo polushariya (Spectral characteristics of atmospheric waves generated by winter stratospheric jet stream in the Northern Hemisphere), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 2, pp. 120–131.
4. Shpynev B.G., Chernigovskaya M.A., Kurkin V.I., Ratovskiy K.G., Belinskaya A.Yu., Stepanov A.E., Bychkov V.V., Grigorieva S.A., Panchenko V.A., Korenkova N.A., Leschenko V.S., Mielich J., Prostranstvennyye variatsii parametrov ionosfery severnogo polushariya nad zimmimi struinymi techeniyami (Spatial variations of the ionosphere parameters over the Northern Hemisphere winter jet streams), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 4, pp. 204–215.
5. Afraimovich E.L., Astafyeva E.I., Demyanov V.V., Edemskiy I.K., Gavrilyuk N.S., Ishin A.B., Kosogorov E.A., Leonovich L.A., Lesyuta O.S., Palamartchouk K.S., Perevalova N.P., Polyakova A.S., Smolkov G.Y., Voeykov S.V., Yasyukevich Y.V., Zhivetiev I.V., A review of GPS/GLONASS studies of the ionospheric response to natural and anthropogenic processes and phenomena, *J. Space Weather and Space Climate*, 2013, Vol. 3, pp. A27–p19, DOI: 10.1051/swsc/2013049.
6. Afraimovich E.L., Edemskiy I.K., Voeykov S.V., Yasyukevich Yu.V., Zhivetiev I.V., Spatio-temporal structure of the wave packets generated by the solar terminator, *Advances in Space Research*, 2009, Vol. 44, No. 7, pp. 824–835, DOI: 10.1016/j.asr.2009.05.017.
7. Afraimovich E.L., Edemskiy I.K., Leonovich A.S., Leonovich L.A., Voeykov S.V., Yasyukevich Y.V., The MHD nature of night-time MSTIDs excited by the solar terminator, *Geophysical Research Letters*, 2009, Vol. 36, No. 15, pp. L15106. DOI: 10.1029/2009GL039803.36.
8. Buonsanto M.J., Ionospheric Storms — A Review, *Space Science Reviews*, 1999, Vol. 88, No. 3/4, pp. 563–601. DOI: 10.1023/A:100510753263.
9. Chernigovskaya M.A., Shpynev B.G., Ratovskiy K.G., Meteorological effects of ionospheric disturbances from vertical radio sounding data, *J. Atmospheric and Terrestrial Physics*, 2015, Vol. 136, pp. 235–243. DOI: 10.1016/j.jastp.2015.07.006.
10. Chernigovskaya M.A., Shpynev B.G., Ratovskiy K.G., Stepanov A.E., The Stratospheric Jet Stream Effects in the High-latitude Ionosphere According to Vertical Radio Sounding Data, *PIERS Proceedings, Prague, Czech Republic, July 6–9, 2015*, pp. 2562–2566.
11. Ding F., Wan W., Liu L., Afraimovich E.L., Voeykov S.V., Perevalova N.P., A statistical study of large-scale traveling ionospheric disturbances observed by GPS TEC during major magnetic storms over the years 2003–2005, *J. Geophysical Research*, 2008, Vol. 113, pp. A00A01. DOI: 10.1029/2008JA013037.
12. Dow J.M., Neilan R.E., Rizos C., The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems, *J. Geodesy*, 2009, Vol. 83, pp. 191–198. DOI: 10.1007/s00190-008-0300-3.
13. Dudok De Wit T., Watermann J., Solar forcing of the terrestrial atmosphere, *Comptes Rendus Geoscience*, 2010, Vol. 342, No. 4, pp. 259–272.
14. Frissell N.A., Baker J.B.H., Ruohoniemi J.M., Greenwald R.A., Gerrard A.J., Miller E.S., West M.L., Sources and characteristics of medium-scale traveling ionospheric disturbances observed by high-frequency radars in the North American sector, *J. Geophysical Research. Space Physics*, 2016, Vol. 121, pp. 3722–3739. DOI: 10.1002/2015JA022168.
15. Fritts D.C., Alexander M.J., Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere, *Reviews Geophysics*, 2003, Vol. 41, No. 1, pp. 1003–1066. DOI: 10.1029/2001RG000106.
16. Gardner C.S., Liu A.Z., Wave-induced transport of atmospheric constituents and its effect on the mesospheric Na layer, *J. Geophys. Res.*, 2010, Vol. 115, pp. D20302. DOI: 10.1029/2010JD014140.
17. Gerrard A.J., Bhattacharya Y., Thayer J.P., Observations of in-situ generated gravity waves during a stratospheric temperature enhancement (STE) event, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, Vol. 11, No. 22, pp. 11,913–11,917. DOI: 10.5194/acp-11-11913-2011.
18. Hocke K., Schlegel K., A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances 1982–1995, *Annales Geophysicae*, 1996, Vol. 14, No 5, pp. 917–940.
19. Hunsucker R.D., Atmospheric gravity waves generated in the high-latitude ionosphere. A review, *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 1982, Vol. 20, No. 2, pp. 293–315.
20. Hunsucker R.D., Hargreaves J.K., *The High-Latitude Ionosphere and Its Effects on Radio Propagation*, New York, Cambridge University Press, 2003. 617 p.
21. Laštovička J., Forcing of the ionosphere by waves from below, *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2006, Vol. 68, pp. 479–497.
22. Liou K., Newell P.T., Anderson B.J., Zanetti L., Meng C.-I., Neutral composition effects on ionospheric storms at middle and low latitudes, *J. Geophysical Research*, 2005, Vol. 110, pp. A05309. DOI: 10.1029/2004JA010840.
23. Mukhtarov P., Pancheva D., Andonov B., Pashova L., Global TEC maps based on GNSS data: 1. Empirical background TEC model, *J. Geophysical Research. Space Physics*, 2013, Vol. 118, pp. 4594–4608. DOI: 10.1002/jgra.50413.
24. Prölss G.W., Werner S., Vibrationally excited nitrogen and oxygen and the origin of negative ionospheric storms, *J. Geophysical Research*, 2002, Vol. 107, No. A2, pp. 1016. DOI: 10.1029/2001JA900126.

25. Ratovsky K.G., Shi J.K., Oinats A.V., Romanova E.B., Comparative study of high-latitude, mid-latitude and low-latitude ionosphere on basis of local empirical models, *Advances in Space Research*, 2014, Vol. 54, No. 3, pp. 509-516.
26. Russell C.T., Luhmann J.G., Jian L.K., How unprecedented a solar minimum? *Reviews of Geophysics*, 2010, Vol. 48, pp. RG2004. DOI: 10.1029/2009RG000316.
27. Shpynev B.G., Churilov S.M., Chernigovskaya M.A., Generation of waves by jet-stream instabilities in winter polar stratosphere/mesosphere, *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2015, Vol. 136, pp. 201–215. DOI: 10.1016/j.jastp.2015.07.005(a).
28. Shpynev B.G., Kurkin V.I., Ratovsky K.G., Chernigovskaya M.A., Belinskaya A.Yu., Grigorieva S.A., Stepanov A.E., Bychkov V.V., Pancheva D., Mukhtarov P., High-midlatitude ionosphere response to major stratospheric warming, *Earth, Planets and Space*, 2015, Vol. 67, article id. 18. DOI: 10.1186/s40623-015-0187-1(b).
29. Tsuda T., Characteristics of atmospheric gravity waves observed using the MU (Middle and Upper atmosphere) radar and GPS (Global Positioning System) radio occultation, *Proc. Japan Academy. Series B*, 2014, Vol. 90, No. 1, pp. 12–27.
30. Vadas S.L., Horizontal and vertical propagation of gravity waves in thermosphere from lower atmospheric and thermospheric sources, *J. Geophysical Research*, 2007, Vol. 112, pp. A06305. DOI: 10.1029/2006JA011845.
31. Vincent R.A., Gravity wave coupling from below: A review, *Climate and Weather of the Sun-Earth System (CAWSES): Selected Papers from the 2007 Kyoto Symposium*. Tokyo: TERRAPUB, 2009, pp. 279–293.
32. Whiteway J.A., Duck T.J., Donovan D.P., Bird J.C., Pal S.R., Carswell A.I., Measurements of gravity wave activity within and around the Arctic stratospheric vortex, *Geophysical Research Letters*, 1997, Vol. 24, No. 11, pp. 1387–1390. DOI: 10.1029/97GL01322.
33. Wu D.L., Waters J.W., Satellite observations of atmospheric variances: A possible indication of gravity waves, *Geophysical Research Letters*, 1996, Vol. 23, No. 24, pp. 3631–3634. DOI: 10.1029/96GL02907.
34. Yasyukevich Yu.V., Mylnikova A.A., Polyakova A.S., Estimating the total electron content absolute value from the GPS/GLONASS data, *Results in Physics*, 2015, Vol. 5, pp. 32–33. DOI: 10.1016/j.rinp.2014.12.006.
35. Yiğit E., Medvedev A.S., Internal waves coupling processes in Earth's atmosphere, *Advances in Space Research*, 2015, Vol. 55, pp. 983–1003.