Ионосферная изменчивость над Европой зимой по данным ионозондов и GPS/ГЛОНАСС

М. А. Черниговская[1], Б. Г. Шпынев[1], А. С. Ясюкевич[1], А.А. Мыльникова[1], Д. С. Хабитуев[1], П. Коуцка Книжова[2], Д. Коуба[2], Й. Мелич[3], А. Козловский[4]

[1] *Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, 664033, Россия*
E-mail: cher@iszf.irk.ru

[2] *Институт физики атмосферы ЧАН, Прага, 14131, Чешская Республика*

[3] *Институт атмосферной физики им. Лейбница, Кюлунгсборн, 18225, Германия*

[4] *Географическая обсерватория Соданкюля, Оулу, Финляндия*

Выполнено исследование широтной зависимости ионосферной изменчивости от конфигурации и параметров высокоскоростного струйного течения, ассоциированного с зимним циркумполярным вихрем на высотах страто-мезосферы, над средне- и высокоширотным регионами Европы в зимние месяцы (с декабря по февраль) в условиях низкой гелио-геомагнитной активности в 2007–2010 гг. Данные о значениях критической частоты, высоты максимума F2-слоя ионосферы и минимальной частоты отражения получены на основе измерений на меридиональной цепи ионозондов DPS-4 в Риме, Пругонице, Юлиусру, Соданкюля. Данные полного электронного содержания получены по измерениям на сети двухчастотных фазовых приёмников GPS/ГЛОНАСС, расположенных в диапазоне широт 40–70° с. ш. и в долготном секторе 10–30° в. д. Расчёт вертикального ПЭС из исходных рядов проводился на основе разработанной модели «абсолютного» полного электронного содержания с учётом дифференциальных кодовых задержек. Для исследования динамики зимних страто-мезосферных струйных течений в северном полушарии использовались данные реанализа ECMWF ERA-Interim. Отмечено существенное повышение волновой активности на высотах страто-мезосферы с ноября по февраль для всех анализируемых лет. Для анализа взаимозависимости ионосферной изменчивости и динамики страто-мезосферы рассматривались кросс-корреляционные функции межсуточной изменчивости параметров ионосферы (по данным ионозондов и GPS/ГЛОНАСС) и скоростей зонального и меридионального ветра в нижней мезосфере (~50 км) по данным реанализа ECMWF ERA-Interim. Выявлена зависимость вариаций ионосферных параметров, наблюдавшихся на разных широтах северного полушария, от положения станций относительно зимнего струйного течения в страто-мезосфере.

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

Одобрена к печати: 28.05.2018
DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-295-307

Введение

Исследование долготной и широтной зависимости изменчивости зимней ионосферы от динамики страто-мезосферного струйного течения (СТ) над регионами Евразийского континента в условиях различной гелио-геомагнитной активности по данным ионозондов и GPS/ГЛОНАСС было выполнено в цикле работ (Шпынев и др., 2016а; Ясюкевич и др., 2017; Chernigovskaya et al., 2015, 2017; Shpynev et al., 2015a; Yasyukevich et al., 2017). В работах (Шпынев и др., 2016а; Chernigovskaya et al., 2017; Shpynev et al., 2015a) были получены новые результаты о долготных вариациях ионосферных параметров на основе данных сети евразийских ионозондов в широтном диапазоне 50–60° с. ш. Впервые было обнаружено, что вариации ионосферных параметров, наблюдавшиеся на разных долготах северного полушария, существенно зависели от положения ионозондов относительно преобладающего зимнего СТ в страто-мезосфере как в спокойных, так и в возмущённых геомагнитных условиях.

В работах (Ясюкевич и др., 2017; Chernigovskaya et al., 2015; Yasyukevich et al., 2017) была исследована зависимость ионосферной изменчивости на основе анализа вариаций максимума электронной концентрации ионосферы и вертикального полного электронного содержания

(ПЭС) над регионами Восточной Сибири и Дальнего Востока по данным ионозондов и приёмников GPS/ГЛОНАСС. Проанализированы широтные, сезонные вариации волновой возмущённости ионосферы и вариации, связанные с изменениями гелио-геомагнитной активности. Отмечена чёткая сезонная зависимость ионосферной изменчивости с периодами ВГВ для всех анализируемых станций, которая не связана с изменениями гелио-геофизических условий. Установлено, что в периоды усиления стратосферной волновой активности зимой наблюдалось заметное повышение высокочастотной части изменчивости в максимуме электронной концентрации F2-слоя и ПЭС (в диапазоне периодов от 0,5 до 6 ч), которая в основном вызвана перемещающимися ионосферными возмущениями, связанными с распространением снизу внутренних гравитационных волн (ВГВ). Самый высокий уровень ВГВ-изменчивости ионосферы наблюдался зимой, самый низкий — летом. Разница лето – зима составляла ~30–40 % и наиболее выражена для высокоширотных станций

В работе (Koucká Knížová et al., 2015) из анализа коэффициентов корреляции временных рядов значений критических частот слоя F2 ионосферы над регионом Европы по данным сети европейских ионозондов за 50-летний период сделано предположение, что тропосферные погодные системы (циклоны, антициклоны) с масштабами порядка 1000 км (или 10° по долготе) могут быть источником пространственно-временных вариаций параметров ионосферы на высотах максимума электронной концентрации.

Цель данной работы заключалась в исследовании широтной зависимости ионосферной изменчивости от конфигурации и параметров высокоскоростного СТ, ассоциированного с зимним циркумполярным вихрем (ЦПВ) на высотах страто-мезосферы, над средне- и высокоширотным регионами Европы в зимние месяцы (с декабря по февраль) в условиях низкой гелио-геомагнитной активности в 2007–2010 гг. Меридиональные цепи радиофизических измерительных установок (ионозондов, приёмников GPS/ГЛОНАСС) эффективно применяются как инструмент исследования специфических особенностей распределений ионосферных параметров в области высоких, средних и экваториальных широт, а также для сравнения характерных распределений ионосферных параметров в разных широтных зонах.

Рис. 1. Схема расположения европейских ионозондов (белые точки) и приёмников GPS/ГЛОНАСС (розовые точки)

Данные измерений атмосферных и ионосферных параметров

В работе выполнено исследование широтной зависимости ионосферной изменчивости на основе совместного анализа:

- данных о значениях критической частоты (f_oF2), высоты максимума (h_mF2) ионосферы и минимальной частоты отражения ($f_{\min}$) по измерениям на меридиональной цепи европейских дигизондов DPS-4 в Риме, Пругонице, Юлиусру, Соданкюля (*рис. 1*, см. с. 296, *табл. 1*);
- данных о значениях ПЭС по измерениям на сети двухчастотных фазовых приёмников GPS/ГЛОНАСС международной сети IGS (Dow et al., 2009) (*рис. 1*, *табл. 2*), расположенных в диапазоне широт 40–70° с. ш. и в долготном секторе 10–30° в. д.;
- данных архива реанализа ECMWF ERA-Interim для описания полей метеопараметров средней атмосферы (Dee et al., 2011) (http://www.ecmwf.int/en/research/climate-reanalysis/era-interim).

В соответствии с классификацией, разделяющей ионосферу на широтные зоны, имеющие существенно разные свойства в зависимости от геомагнитной широты (Hunsucker, Hargreaves, 2003), дигизонды в Риме, Пругонице и Юлиусру измеряют параметры, характеризующие состояние среднеширотной ионосферы, а дигизонд в Соданкюля регистрирует параметры высокоширотной ионосферы.

Таблица 1. Меридиональная цепь европейских ионозондов

Дигизонды DPS-4	Северная широта, град	Восточная долгота, град
Рим	41,9	12,5
Пругонице	50,0	14,6
Юлиусру	54,6	13,4
Соданкюля	67,3	26,6

Таблица 2. Сеть приёмников GPS/ГЛОНАСС

Приёмники GPS/ГЛОНАСС	Северная широта, град	Восточная долгота, град
mate	40,7	16,7
aqui	42,4	13,4
unpg	43,1	12,4
medi	44,5	11,6
mtbg	47,7	16,4
linz	48,3	14,3
wtza	49,1	12,9
gope	49,9	14,8
dres	51,0	13,7
wroc	51,1	17,1
bor1	52,3	17,1
lama	53,9	20,7
vis0	57,7	18,4
mets	60,2	24,4
vaas	62,9	21,8
kiru	67,9	20,9
tro1	69,7	18,9

Постановка задачи и методика исследования

Большое количество экспериментальных и теоретических исследований свидетельствуют о том, 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 определённых условиях проникающие на высоты ионосферы (Goncharenko et al., 2013; Hoffmann et al., 2012; Medvedev et al., 2013; Medvedeva, Ratovsky, 2015; Pancheva, Mukhtarov, 2010; Pancheva et al., 2008; Pedatella, Forbes, 2010; Polyakova et al., 2014; Zolotukhina et al., 2011; Yiğit, Medvedev, 2015).

В работе (Shpynev et al., 2015b) показано, что с развитием зимних СТ на высотах стратосферы и нижней мезосферы, локализованных на широтах 50–80° с. ш., ассоциированы среднемасштабные волновые движения в поле вертикальных скоростей атмосферного газа, которые могут быть источниками распространяющихся вверх гравитационных волн. Источником генерации ВГВ могут являться сдвиговые неустойчивости внутри ЦПВ. Эти волновые возмущения передаются на высоты нижней мезосферы и выше и проявляются в виде перемещающихся атмосферных и ионосферных возмущений (Шпынев и др., 2016б; Yasyukevich et al., 2017). В работах (Шпынев и др., 2016а; Chernigovskaya et al., 2017; Shpynev et al., 2015a) из анализа данных среднеширотной цепи ионозондов показано, что вариации ионосферных параметров, наблюдавшиеся на разных долготах северного полушария, существенно зависели от положения ионозондов относительно преобладающего зимнего СТ в страто-мезосфере. Конфигурация СТ сильно изменялась в течение зимы. Ионозонды при этом оказывались под различными зонами СТ. Разница в значениях критических частот для ионозондов, разнесённых по долготе всего на 15–20°, могла достигать 1,5–2 МГц в зависимости от расположения пункта наблюдения под СТ или вне его.

Крупномасштабные динамические структуры на высотах страто-мезосферы, в свою очередь, подвержены воздействию приливов и планетарных волн, распространяющихся из тропосферы. Поскольку земная атмосфера — нелинейная система, в результате нелинейного взаимодействия первичных атмосферных волн между собой и/или с преобладающим атмосферным потоком происходит генерация вторичных волн с частотами и зональными волновыми числами, которые являются суммой и разностью частот и волновых чисел первичных волн, участвующих в нелинейном взаимодействии, а также происходит модуляция амплитуды более высокочастотной волны периодом волны меньшей частоты (Hoffmann et al., 2012; Lieberman et al., 2015; Pancheva, 2001). В результате спектр волн, наблюдаемых в верхней атмосфере и ионосфере, становится очень широким.

Волновые возмущения различных пространственно-временных масштабов, генерируемые в нижней и средней атмосфере, частично распространяются вверх, возмущают нижнюю термосферу и, как следствие, — ионосферу (Goncharenko et al., 2013; Hoffmann et al., 2012; Medvedeva, Ratovsky, 2015; Pancheva, Mukhtarov, 2010; Pancheva et al., 2008; Pedatella, Forbes, 2010; Polyakova et al., 2014; Zolotukhina et al., 2011). Таким образом, эффекты, наблюдаемые в ионосфере, могут в большой степени зависеть от динамики нижележащей нейтральной атмосферы.

Для совместного анализа пространственно-временных вариаций атмосферных параметров на высотах страто-мезосферы и ионосферных параметров использовались: среднедневные данные ионосферных параметров по измерениям ионозондов и приёмников GPS/ГЛОНАСС; дневные шестичасовые значения зональной и меридиональной скоростей ветра в области нижней мезосферы на уровне 1 гПа (~50 км) по данным архива реанализа ECMWF ERA-Interim.

Из рядов исходных данных ПЭС на сети европейских приёмников GPS/ГЛОНАСС рассчитывались ряды вертикального ПЭС по методике, подробно описанной в работе (Yasyukevich et al., 2015). Данная методика позволяет получать ряды вертикального ПЭС с корректным учётом дифференциальных кодовых задержек. В качестве показателя уровня ионосферной изменчивости при анализе вариаций ПЭС использовался коэффициент вариаций *vrTEC*, представляющий собой нормированную дисперсию ПЭС в дневное время (Ясюкевич и др.,

2017). Выбранный для расчёта коэффициента вариаций ПЭС период усреднения на временном интервале 12–16 LT, сдвинутый относительно местного полудня к вечерним часам, позволил избежать вклада эффектов солнечного терминатора в *vrTEC*.

Данные меридиональной цепи европейских ионозондов о значениях критической частоты (f_oF2), высоты максимума (h_mF2) F2-слоя ионосферы и минимальной частоты отражения ($f_{\min}$) с временным разрешением 1 ч усреднялись за 6-часовой интервал, центрированный относительно местного полудня.

Для исследования взаимосвязи между ионосферной изменчивостью и динамикой стратомезосферы мы рассматривали взаимную корреляцию межсуточных вариаций среднедневных значений ионосферных параметров и горизонтальных скоростей движения нейтрального газа в зимнем ЦПВ на высотах нижней мезосферы. Для расчёта взаимной корреляции временных рядов ионосферных и атмосферных параметров использовалась кросс-корреляционная функция (ККФ) Пирсона с временным сдвигом:

$$R(\tau) = \frac{\int \left(X(t) - \bar{X}\right) \cdot \left(Y(t+\tau) - \bar{Y}\right) \mathrm{d}t}{\sqrt{\sigma_X \sigma_Y}}. \quad (1)$$

Предполагалось, что атмосферное воздействие на ионосферу происходит с временной задержкой. Если это воздействие имеет периодичность, то функция кросс-корреляции будет модулирована. Это даёт возможность оценить общие периодичности из Фурье-спектра кросс-корреляционной функции:

$$F(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int R(\tau) \cdot \mathrm{e}^{-i\omega\tau}\, \mathrm{d}\tau. \quad (2)$$

Результаты анализа и обсуждение

Рассмотрим результаты, полученные в ходе исследования широтной зависимости ионосферной изменчивости от конфигурации и параметров высокоскоростного СТ, ассоциированного с зимним ЦПВ, на примере анализа данных для зимы 2009/2010 гг. (с декабря 2009 г. по февраль 2010 г.).

На основе данных архива реанализа ECMWF ERA-Interim (Dee et al., 2011), позволяющих исследовать трёхмерные поля скоростей атмосферного газа на высотах стратосферы и нижней мезосферы с разрешением ~80 км (0,75° по долготе и широте) на 60 вертикальных уровнях от поверхности Земли до 0,1 гПа (~65 км), были выявлены периоды формирования зимних ЦПВ в широтном диапазоне 50–80° с. ш. на высотах стратосферы и нижней мезосферы с декабря по февраль для всех анализируемых лет, с которыми ассоциированы высокоскоростные СТ. Следует отметить, что все зимы периода 2007–2010 гг. ознаменовались значительными стратосферными потеплениями. ВСП зимы 2009/2010 гг. было не столь сильным, как события ВСП в 2008 и 2009 гг. Пиковая стратосферная температура на Северном полюсе на уровне 10 гПа была достигнута 22 января, и температура оставалась выше долгосрочного среднего в течение двухнедельного периода (Goncharenko et al., 2013). Рисунок 2 (см. с. 300) демонстрирует картину трансформаций Арктического ЦПВ в январе 2010 г. во время ВСП на высоте нижней мезосферы. С его развитием в конце января 2010 г. ЦПВ разделился на два вихря: циклонический и антициклонический. Из рисунка также можно отметить, что европейские ионозонды с течением времени располагались под различными зонами стратосферной циркуляции.

Поскольку доминирующим фактором в термодинамическом режиме ионосферы является гелио-геомагнитная активность, для эффективного разделения источников регистрируемых ионосферных возмущений при анализе учитывалась сопутствующая гелио-геомагнитная возмущённость. В целом период 2007–2010 гг. характеризовался продолжительным минимумом солнечной активности с $F_{10.7}$ ~ 70 и с низкой интенсивностью сопутствующих геомагнитных возмущений.

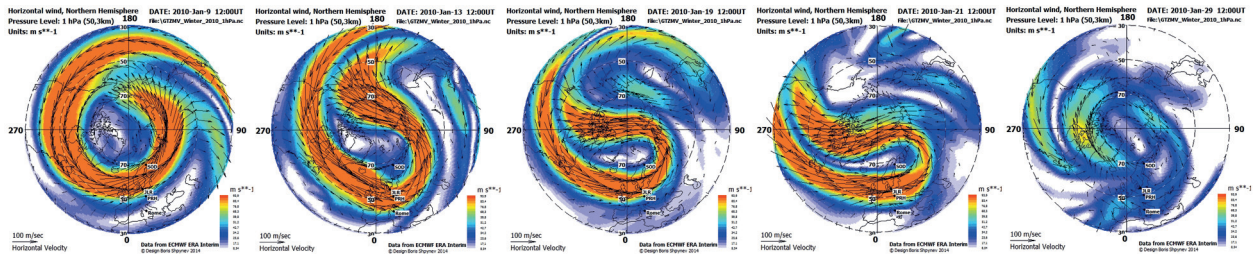

Рис. 2. Трансформация СТ (поле горизонтальных скоростей, м/с) на уровне 1 гПа (~50 км) в 12 UT для отдельных дней (9, 13, 19, 21, 29) января 2010 г.

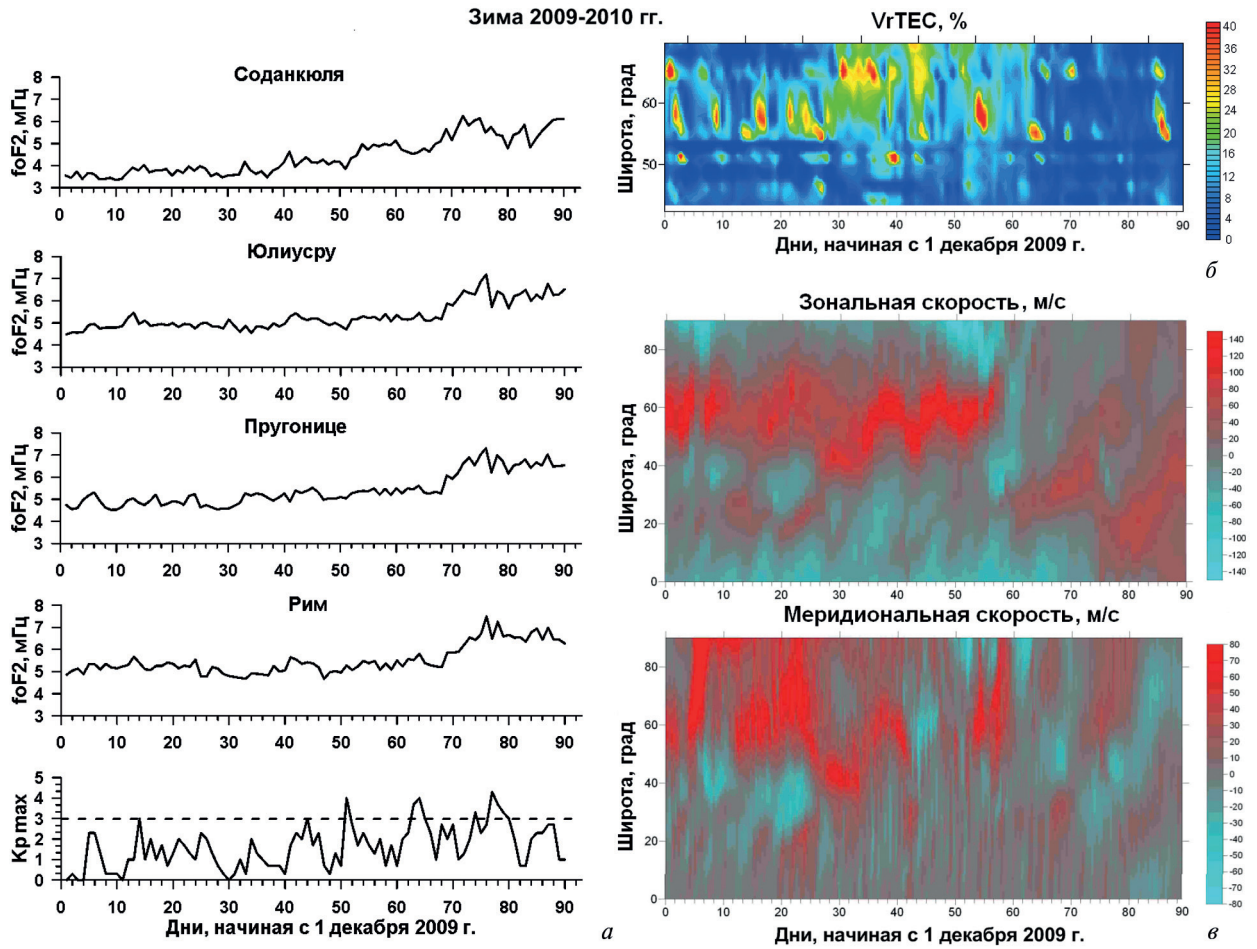

Рис. 3. Временные вариации среднедневных f_oF2 и максимального за сутки геомагнитного индекса K_p (*а*); широтно-временные распределения в дневное время *vrTEC* (*б*) и компонент скорости горизонтального ветра на уровне 1 гПа (~50 км) (*в*) для зимы (декабрь – февраль) 2009/2010 гг.

На *рис. 3а* представлены межсуточные вариации среднедневной критической частоты f_oF2 ионосферы по данным меридиональной цепи европейских ионозондов, а также максимального за сутки геомагнитного индекса K_p (нижняя панель). На *рис. 3б* приведено широтно-временное распределение коэффициента вариаций *vrTEC* в дневное время по данным сети европейских приёмников GPS/ГЛОНАСС, а на *рис. 3в* — широтно-временное распределение дневных значений зональной и меридиональной компонент скорости атмосферного газа в области нижней мезосферы на уровне 1 гПа (~50 км) по данным архива реанализа ECMWF ERA-Interim.

Исходя из *рис. 3а* в целом следует отметить схожесть характера временных вариаций среднедневных значений f_oF2 по данным меридиональной цепи европейских ионозондов.

Геомагнитная возмущённость была низкой с $K_p \leqslant 3$ (уровень $K_p = 3$ отмечен пунктиром на графике нижней панели). Лишь в отдельные дни в конце января и в феврале 2010 г. отмечалась слабо возмущённая геомагнитная обстановка с $K_p = 4_$. С этими усилениями геомагнитной активности очевидно связаны синхронные пики на графиках временных вариаций f_oF2 во второй половине февраля 2010 г. по данным всех ионозондов.

На *рис. 3б* приведено широтно-временное распределение коэффициента вариаций *vrTEC* в дневное время по данным сети европейских приёмников GPS/ГЛОНАСС. Из распределения *vrTEC* можно отметить квазипериодические усиления уровня ионосферной возмущённости на средних широтах. Сильные вариации (до 40 %) дневного ПЭС наблюдались в течение всего января 2010 г. в высоких и средних широтах. Одновременно с этим в январе отмечались существенные вариации скорости горизонтального ветра на высотах страто-мезосферы (*рис. 3в*), которые были связаны с трансформациями зимнего ЦПВ в этот период (*рис. 2*) и развитием ВСП во второй половине января. В конце января произошло обращение зонального ветра на восточное вплоть до середины февраля 2010 г. (см. также *рис. 2*, крайнюю панель справа, соответствующую 29 января 2010 г.).

Для анализа взаимосвязи между ионосферной изменчивостью и динамикой страто-мезосферы мы рассчитали взаимную корреляцию межсуточных вариаций среднедневных значений ионосферных параметров и горизонтальных скоростей движения нейтрального газа в СТ на высотах нижней мезосферы. На *рис. 4* для примера представлены ККФ, рассчитанные для зимы 2009/2010 гг. по формуле (1), между временными рядами данных измерений по значениям f_oF2, h_mF2 и $f_{\min}$, полученными на цепи ионозондов, и рядами данных по дневной зональной (верхняя панель) и меридиональной (нижняя панель) скорости ветра в области нижней мезосферы на уровне 1 гПа по данным архива реанализа ECMWF ERA-Interim. На графиках *рис. 4* на оси абсцисс нанесён сдвиг между временными рядами данных, а на оси ординат — коэффициент корреляции. Аналогичным образом были рассчитаны ККФ для временных рядов спутниковых данных ПЭС по данным приёмников GPS/ГЛОНАСС.

Невысокие в целом значения коэффициентов ККФ при малых временных сдвигах свидетельствуют об отсутствии прямой связи между процессами. Из графиков видно, что ККФ ионосферных параметров по измерениям ионозондов и скоростей движения нейтрального газа в зимнем ЦПВ на высотах нижней мезосферы имеют несколько гармоник с разными периодами.

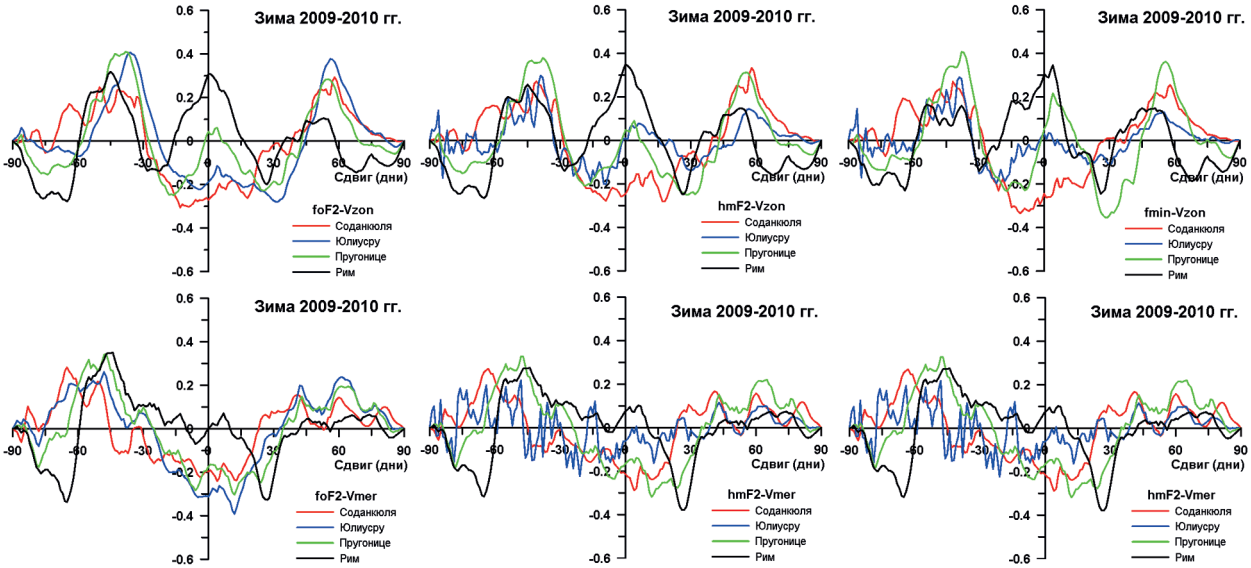

Рис. 4. ККФ между данными измерений европейских ионозондов по значениям f_oF2, h_mF2 и $f_{\min}$ и данными реанализа ECMWF ERA-Interim по дневной зональной (*верхняя панель*) и меридиональной (*нижняя панель*) скорости ветра в СТ на высоте нижней мезосферы для зимы 2009/2010 гг.

Периодические вариации ККФ означают, что анализируемые параметры коррелируют с временной задержкой либо эти параметры подвержены воздействию одних и тех же периодических процессов (например, планетарных волн Россби, солнечно-лунных приливов). Это подтверждается также идентичностью вариаций ККФ, описывающих взаимосвязь динамических параметров нижней мезосферы с параметрами ионосферы на разных высотных уровнях — на высоте нижней ионосферы (корреляция с $f_{\min}$) и на высоте максимума ионизации в F2-области (корреляция с f_oF2, h_mF2). Отмечается также схожесть ККФ для данных среднеширотных ионозондов Юлиусру и Пругонице, часто одновременно находящихся под областью развития страто-мезосферного СТ зимой (см. *рис. 2*). Наибольшие различия наблюдаются для данных высокоширотной станции Соданкюля и Рима, которые чаще расположены под областью вне СТ. Это подтверждает предположение о влиянии зимнего страто-мезосферного СТ на состояние ионосферы.

Предполагалось, как отмечалось выше, что атмосферное воздействие на ионосферу носит квазиволновой характер и происходит с временной задержкой. Поэтому функция кросс-корреляции между параметрами ионосферы и нижележащей атмосферы должна быть модулирована. Для оценки общих периодичностей вариаций ионосферных и атмосферных параметров был выполнен спектральный анализ ККФ, описывающих взаимосвязь динамических параметров нижней мезосферы с ионосферными параметрами по измерениям на меридиональной цепи ионозондов и на сети двухчастотных фазовых приёмников GPS/ГЛОНАСС, по формуле (2). На *рис. 5* на примере зимы 2009/2010 гг. приведены типичные спектры ККФ, показывающие наличие общих периодичностей ~2, 4, 5, 7, 9, 13, 15, 18, 25–30 сут, которые наблюдаются для всех анализируемых лет. Присутствие в спектрах рядов данных, характеризующих состояние нижней мезосферы и ионосферы, периодичностей в ~2–30 сут является свидетельством влияния планетарных волн Россби и экспериментально подтверждает связь глобальной циркуляции в страто-мезосфере с ионосферной изменчивостью. Подобные волновые возмущения в вариациях атмосферных и ионосферных параметров на средних широтах в зимний сезон с периодами примерно 4–6, 9–11, 14–18 сут отмечены во многих исследованиях (Hoffmann et al., 2012; Pancheva, 2001; Pancheva et al., 2008; Zolotukhina et al., 2011). Эти глобальные осцилляции относят к нормальным модам Россби с периодами ~5, 10 и 16 сут с малыми зональными волновыми числами ($I = 1, 2, 3$). Такие глобальные планетарные волны часто возникают в тропосфере, распространяются через стратосферу и мезосферу к области мезопаузы и распространяются на запад. Устойчивое присутствие в спектрах ККФ периодичностей ~13, 25–30 сут может быть связано, на наш взгляд, с приливными гравитационными колебаниями. Эти колебательные процессы вносят существенный вклад в динамику средней и верхней атмосферы, а также проявляются в ионосферных параметрах (Шпынев и др., 2014).

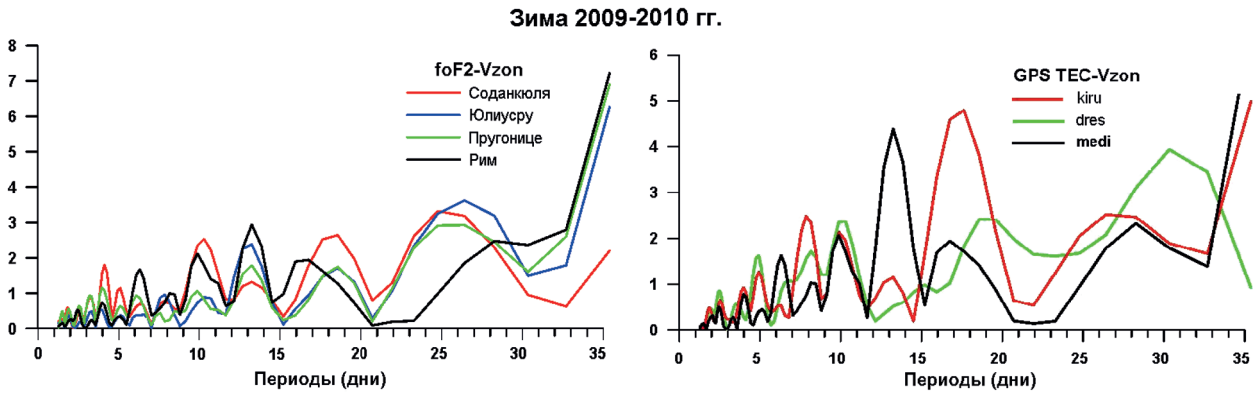

Рис. 5. Спектры ККФ между дневными значениями скорости зонального ветра в СТ на высоте нижней мезосферы и значениями f_oF2 (*слева*) и ПЭС (*справа*) для зимы 2009/2010 гг.

Две основные моды суммарного фазо-разностного гравитационного прилива Солнца и Луны соответствуют полумесячной волне 13,6 сут и месячной волне 27,5 сут. Месячная волна практически совпадает с циклом солнечной активности, связанной с периодом дифференциального вращения Солнца (25–30 сут).

Следует отметить, что для зим 2007/2008 и 2008/2009 гг. получены в целом аналогичные результаты.

Выводы

Выполненное в работе исследование широтной зависимости ионосферной изменчивости от параметров высокоскоростного СТ, ассоциированного с зимним ЦПВ на высотах страто-мезосферы, над регионом Европы в зимние месяцы в условиях низкой гелио-геомагнитной активности в 2007–2010 гг. позволило сделать следующие выводы.

ККФ функции между временными рядами среднедневных значений параметров ионосферы по измерениям меридиональной цепи ионозондов и сети приёмников GPS/ГЛОНАСС и временными рядами значений скоростей горизонтального ветра нейтрального газа в дневное время в зимнем ЦПВ на высотах нижней мезосферы по данным реанализа ECMWF ERA-Interim имеют несколько гармоник с разными периодами. Невысокие в целом значения коэффициентов ККФ при малых временных сдвигах свидетельствуют об отсутствии прямой связи между процессами. Периодические вариации ККФ означают, что анализируемые параметры либо коррелируют с временной задержкой, либо эти параметры подвержены воздействию одних и тех же периодических процессов (например, планетарных волн Россби, солнечно-лунных гравитационных приливов). Этот вывод подтверждается также идентичностью вариаций ККФ, описывающих взаимосвязь динамических параметров нижней мезосферы с параметрами ионосферы на разных высотных уровнях и с ПЭС. Схожесть кросс-корреляционных функций для данных среднеширотных ионозондов Юлиусру и Пругонице, часто одновременно находящихся под областью развития страто-мезосферного СТ зимой, и наибольшие различия, отмеченные для данных высокоширотной станции Соданкюля и среднеширотной станции Рим, которые чаще расположены под областью вне СТ, подтверждают возможное влияние зимнего страто-мезосферного СТ на ионосферу.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 18-05-00681 и 16-05-01087.

Литература

1. *Шпынев Б. Г.*, *Ойнац А. В.*, *Черниговская М. А.*, *Орлов И. И.*, *Белинская А. Ю.*, *Грехов О. М.* Проявление гравитационных приливов и планетарных волн в долгопериодных вариациях геофизических параметров // Геомагнетизм и аэрономия. 2014. Т. 54. № 4. С. 540–552. DOI: 10.7868/S0016794014040166.
2. *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.*, *Лещенко В. С.*, *Мелич Й.* (2016а) Пространственные вариации параметров ионосферы северного полушария над зимними струйными течениями // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 4. С. 204–215. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-5-204-215.
3. *Шпынев Б. Г.*, *Черниговская М. А.*, *Хабитуев Д. С.* (2016б) 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. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-2-120-131.
4. *Ясюкевич А. С.*, *Черниговская М. А.*, *Мыльникова А. А.*, *Шпынев Б. Г.*, *Хабитуев Д. С.* Сезонные вариации ионосферной возмущенности в различных гелио-геомагнитных условиях по данным GPS/ГЛОНАСС над регионами Восточной Сибири и Дальнего Востока // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 4. С. 249–262. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-249-262.

5. *Chernigovskaya M. A.*, *Shpynev B. G.*, *Ratovsky K. G.* Meteorological effects of ionospheric disturbances from vertical radio sounding data // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2015. V. 136. P. 235–243. DOI: 10.1016/j.jastp.2015.07.006.
6. *Chernigovskaya M. A.*, *Shpynev B. G.*, *Ratovsky K. G.*, *Belinskaya A. Yu.*, *Stepanov A. E.*, *Bychkov V. V.*, *Grigorieva S. A.*, *Panchenko V. A.*, *Korenkova N. A.*, *Mielich J.* Ionospheric Response to Winter Stratosphere/Lower Mesosphere Jet Stream in the Northern Hemisphere as Derived from Vertical Radio Sounding Data // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2017. DOI: 10.1016/j.jastp.2017.08.033.
7. *Dee D. P.*, *Uppala S. M.*, *Simmons A. J.*, *Berrisford P.*, *Poli P.*, *Kobayashi S.*, *Andrae U.*, *Balmaseda M. A.*, *Balsamo G.*, *Bauer P.*, *Bechtold P.*, *Beljaars A. C. M.*, *van de Berg L.*, *Bidlot J.*, *Bormann N.*, *Delsol C.*, *Dragani R.*, *Fuentes M.*, *Geer A. J.*, *Haimberger L.*, *Healy S. B.*, *Hersbach H.*, *Hólm E. V.*, *Isaksen L.*, *Kållberg P.*, *Köhler M.*, *Matricardi M.*, *McNally A. P.*, *Monge-Sanz B. M.*, *Morcrette J.-J.*, *Park B.-K.*, *Peubey C.*, *de Rosnay P.*, *Tavolato C.*, *Thépaut J.-N.*, *Vitart F.* The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // Quarterly J. Royal Meteorological Society. 2011. V. 137. P. 553–597. DOI: 10.1002/qj.828.
8. *Dow J. M.*, *Neilan R. E.*, *Rizos C.* The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems // J. Geodesy. 2009. V. 83. P. 191–198. DOI: 10.1007/s00190-008-0300-3.
9. *Goncharenko L. P.*, *Hsu V. W.*, *Brum C. G. M.*, *Zhang S.-R.*, *Fentzke J. T.* Wave signatures in the midlatitude ionosphere during a sudden stratospheric warming of January 2010 // J. Geophysical Research. Space Physics. 2013. V. 118. P. 1–16. DOI: 10.1029/2012JA018251.
10. *Hoffmann P.*, *Jacobi Ch.*, *Borries C.* Possible planetary wave coupling between the stratosphere and ionosphere by gravity wave modulation // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2012. V. 75–76. P. 71–80. DOI: 10.1016/j.jastp.2011.07.008.
11. *Hunsucker R. D.*, *Hargreaves J. K.* The High-Latitude Ionosphere and Its Effects on Radio Propagation. N. Y.: Cambridge University Press, 2003. 617 p.
12. *Koucká Knížová P.*, *Mošna Z.*, *Kouba D.*, *Potužníková K.*, *Boška J.* Influence of meteorological systems on the ionosphere over Europe // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2015. V. 136. P. 244–250. DOI: 10.1016/j.jastp.2015.07.017.
13. *Lieberman R. S.*, *Riggin D. M.*, *Ortland D. A.*, *Oberheide J.*, *Siskind D. E.* Global observations and modeling of nonmigrating diurnal tides generated by tide-planetary wave interactions // J. Geophysical Research. Atmosphere. 2015. V. 120. P. 11419–11437. DOI: 10.1002/2015JD023739.
14. *Medvedeva I.*, *Ratovsky K.* Studying atmospheric and ionospheric variabilities fromlong-termspectrometric and radio sounding measurements // J. Geophysical Research. Space Physics. 2015. V. 120. P. 5151–5159. DOI: 10.1002/2015JA021289.
15. *Medvedev A. V.*, *Ratovsky K. G.*, *Tolstikov M. V.*, *Alsatkin S. S.*, *Scherbakov A. A.* Studying of the spatial-temporal structure of wavelike ionospheric disturbances on the base of Irkutsk incoherent scatter radar and Digisonde data // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2013. V. 105–106. P. 350–357. DOI: 10.1016/j.jastp.2013.09.001.
16. *Pancheva D.* Evidence for Nonlinear Interaction Between Quasi-2-Day Wave and Long-Period Oscillations in the Lower Thermosphere above Bulgaria // Comptes Rendus de l'Academie Bulgare des Sciences. 2001. V. 54. No. 2. P. 39–44.
17. *Pancheva D.*, *Mukhtarov P.* Strong evidence for the tidal control on the longitudinal structure of the ionospheric F-region // Geophysical Research Letters. 2010. V. 37. P. L14105. DOI: 10.1029/2010GL044039.
18. *Pancheva D. V.*, *Mukhtarov P. J.*, *Mitchell N. J.*, *Fritts C. D.*, *Riggin M. D.*, *Takahashi H.*, *Batista P. P.*, *Clemesha B. R.*, *Gurubaran S.*, *Ramkumar G.* Planetary wave coupling (5–6-day waves) in the low-latitude atmosphere-ionosphere system // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2008. V. 70. P. 101–122. DOI: 10.1016/j.jastp.2007.10.003.
19. *Pedatella N. M.*, *Forbes J. M.* Evidence for stratosphere sudden warming–ionosphere coupling due to vertically propagating tides // Geophysical Research Letters. 2010. V. 37. P. L11104. DOI: 10.1029/2010GL043560.
20. *Polyakova A. S.*, *Chernigovskaya M. A.*, *Perevalova N. P.* Ionospheric effects of sudden stratospheric warmings in eastern Siberia region // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2014. V. 120. P. 15–23. DOI: 10.1016/j.jastp.2014.08.011.
21. *Shpynev B. G.*, *Churilov S. M.*, *Chernigovskaya M. A.* (2015a) Generation of waves by jet-stream instabilities in winter polar stratosphere/mesosphere // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2015. V. 136. P. 201–215. DOI: 10.1016/j.jastp.2015.07.005.
22. *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.* (2015b) High-midlatitude ionosphere response to major stratospheric warming // Earth, Planets and Space. 2015. V. 67. P. 18. DOI: 10.1186/s40623-015-0187-1.

23. *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. V. 5. P. 32–33. DOI: 10.1016/j.rinp.2014.12.006.
24. *Yasyukevich A. S.*, *Chernigovskaya M. A.*, *Mylnikova A. A.*, *Shpynev B. G.*, *Khabituev D. S.* Seasonal and heliogeomagnetic activity pattern of the ionospheric variability over Russia's Eastern Siberia and Far East region from the GPS/GLONASS data // 2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium — Spring (PIERS). St. Petersburg. 2017. P. 2015–2022. DOI: 10.1109/PIERS.2017.8262081.
25. *Zolotukhina N.*, *Polekh N.*, *Pirog O.* Variability of the ionosphere over Irkutsk at low solar activity // Advances in Space Research. 2011. V. 48. No. 10. P. 1606–1612. DOI: 10.1016/j.asr.2011.08.006.
26. *Yiğit E.*, *Medvedev A. S.* Internal waves coupling processes in Earth's atmosphere // Advances in Space Research. 2015. V. 55. P. 983–1003. DOI: 10.1016/j.asr.2014.11.020.

Ionospheric variability over Europe in winter from the ionosonde and GPS/GLONASS data

M. A. Chernigovskaya[1], B. G. Shpynev[1], A. S. Yasyukevich[1], A. A. Mylnikova[1], D. S. Khabituev[1], P. Koucká Knížová[2], D. Kouba[2], J. Mielich[3], A. Kozlovsky[4]

[1] *Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS*, *Irkutsk 664033*, *Russia*
E-mail: cher@iszf.irk.ru
[2] *Institute of Atmospheric Physics CAS*, *Prague 14131*, *Czech Republic*
[3] *Leibniz Institute for Atmospheric Physics*, *Kühlungsborn 18225*, *Germany*
[4] *Sodankylä Geophysical Observatory*, *Oulu*, *Finland*

The latitudinal dependence of ionospheric variability on the configuration and parameters of high-speed jet streams associated with the winter circumpolar vortex at the stratosphere/lower mesosphere heights are studied. We conducted a joint analysis of the variations of the ionospheric F2-layer electron density peak and total electron content (TEC) of the ionosphere over the mid- and high-latitude regions of Europe in winter months (December to February) from 2007 to 2010 under low solar and geomagnetic activity conditions. The ionosphere parameters were obtained from measurements made at the meridional chain of European vertical sounding ionosondes Rome (41.9°N, 12.5°E), Pruhonice (50.0°N, 14.6°E), Juliusruh (54.6°N, 13.4°E), Sodankylä (67.3°N, 26.6°E). The measurements on the basis of a network of the phase dual-frequency GPS/GLONASS receivers located in the range of 40–70°N and 10–30°E were made. They were used to obtain TEC. The calculation of the vertical total electron content from the initial series was based on the developed "absolute" TEC model taking into account differential code biases. We use the data from the ECMWF ERA-Interim reanalysis to study the dynamics of the winter circumpolar vortex in the Northern Hemisphere. The analysis showed the significant increase in wave-like activity in the stratosphere/lower mesosphere during winter seasons for all analyzed years. Variations of ionospheric parameters observed at different latitudes depend on the station positions relative to the jet stream circulation zone.

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

Accepted: 28.05.2018
DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-295-307

References

1. Shpynev B. G., Oinats A. V., Lebedev V. P., Chernigovskaya M. A., Orlov I. I., Belinskaya A. Y., Grekhov O. M., Manifestation of gravitational tides and planetary waves in long-term variations in geophysical parameters, *Geomagnetism and Aeronomy*, 2014, Vol. 54, No. 4, pp. 500–512, DOI: 10.1134/S001679321404015X.

2. Shpynev B. G., Chernigovskaya M. A., Kurkin V. I., Ratovsky 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., Prostranstvennye variatsii parametrov ionosfery severnogo polushariya nad zimnimi struinymi techeniyami (Spatial variations of the ionosphere parameters over the Northern Hemisphere winter jet streams), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 4, pp. 204–215, DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-5-204-215.
3. Shpynev B. G., Chernigovskaya M. A., Khabituev D. S., Spektral'nye kharakteristiki atmosfernykh voln, generiruemykh zimnim stratosfernym struinym techeniem severnogo polushariya (Spectral characteristics of atmospheric waves generated by winter stratospheric jet stream in the Northern Hemisphere), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 2, pp. 120–131, DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-2-120-131.
4. Yasyukevich A. S., Chernigovskaya M. A., Mylnikova A. A., Shpynev B. G., Khabituev D. S., Sezonnye variatsii ionosfernoi vozmushchennosti v razlichnykh gelio-geomagnitnykh usloviyakh po dannym GPS/GLONASS nad regionami Vostochnoi Sibiri i Dal'nego Vostoka (Studying the seasonal pattern of the ionospheric variability over Eastern Siberia and Far East region from the GPS/GLONASS data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 4, pp. 249–262, DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-249-262.
5. Chernigovskaya M. A., Shpynev B. G., Ratovsky K. G., Meteorological effects of ionospheric disturbances from vertical radio sounding data, *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2015, Vol. 136, pp. 235–243, DOI: 10.1016/j.jastp.2015.07.006.
6. Chernigovskaya M. A., Shpynev B. G., Ratovsky K. G., Belinskaya A. Yu., Stepanov A. E., Bychkov V. V., Grigorieva S. A., Panchenko V. A., Korenkova N. A., Mielich J., Ionospheric Response to Winter Stratosphere/Lower Mesosphere Jet Stream in the Northern Hemisphere as Derived from Vertical Radio Sounding Data, *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2017, DOI: 10.1016/j.jastp.2017.08.033.
7. Dee D. P., Uppala S. M., Simmons A. J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M. A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A. C. M., van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A. J., Haimberger L., Healy S. B., Hersbach H., Hólm E. V., Isaksen L., Kållberg P., Köhler M.,, Matricardi M., McNally A. P., Monge-Sanz B. M., Morcrette J.-J., Park B.-K., Peubey C., de Rosnay P., Tavolato C., Thépaut J.-N., Vitart F., The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system, *Quarterly J. Royal Meteorological Society*, 2011, Vol. 137, pp. 553–597, DOI: 10.1002/qj.828.
8. 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.
9. Goncharenko L. P., Hsu V. W., Brum C. G. M., Zhang S.-R., Fentzke J. T., Wave signatures in the midlatitude ionosphere during a sudden stratospheric warming of January 2010, *J. Geophysical Research. Space Physics*, 2013, Vol. 118, pp. 1–16, DOI: 10.1029/2012JA018251.
10. Hoffmann P., Jacobi Ch., Borries C., Possible planetary wave coupling between the stratosphere and ionosphere by gravity wave modulation, *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2012, Vol. 75–76, pp. 71–80, DOI: 10.1016/j.jastp.2011.07.008.
11. Hunsucker R. D., Hargreaves J. K., *The High-Latitude Ionosphere and Its Effects on Radio Propagation*, New York: Cambridge University Press, 2003, 617 p.
12. Koucká Knížová P., Mošna Z., Kouba D., Potužníková K., Boška J., Influence of meteorological systems on the ionosphere over Europe, *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2015, Vol. 136, pp. 244–250, DOI: 10.1016/j.jastp.2015.07.017.
13. Lieberman R. S., Riggin D. M., Ortland D. A., Oberheide J., Siskind D. E., Global observations and modeling of nonmigrating diurnal tides generated by tide-planetary wave interactions, *J. Geophysical Research. Atmosphere*, 2015, Vol. 120, pp. 11419–11437, DOI: 10.1002/2015JD023739.
14. Medvedeva I., Ratovsky K., Studying atmospheric and ionospheric variabilities fromlong-termspectrometric and radio sounding measurements, *J. Geophysical Research. Space Physics*, 2015, Vol. 120, pp. 5151–5159, DOI: 10.1002/2015JA021289.
15. Medvedev A. V., Ratovsky K. G., Tolstikov M. V., Alsatkin S. S., Scherbakov A. A., Studying of the spatial-temporal structure of wavelike ionospheric disturbances on the base of Irkutsk incoherent scatter radar and Digisonde data, *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2013, Vol. 105–106, pp. 350–357, DOI: 10.1016/j.jastp.2013.09.001.
16. Pancheva D., Evidence for Nonlinear Interaction Between Quasi-2-Day Wave and Long-Period Oscillations in the Lower Thermosphere above Bulgaria, *Comptes Rendus de l'Academie Bulgare des Sciences*, 2001, Vol. 54, No. 2, pp. 39–44.

17. Pancheva D., Mukhtarov P., Strong evidence for the tidal control on the longitudinal structure of the ionospheric F-region, *Geophysical Research Letters*, 2010, Vol. 37, p. L14105, DOI: 10.1029/2010GL044039.
18. Pancheva D. V., Mukhtarov P. J., Mitchell N. J., Fritts C. D., Riggin M. D., Takahashi H., Batista P. P., Clemesha B. R., Gurubaran S., Ramkumar G., Planetary wave coupling (5–6-day waves) in the low-latitude atmosphere-ionosphere system, *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2008, Vol. 70, pp. 101–122, DOI: 10.1016/j.jastp.2007.10.003.
19. Pedatella N. M., Forbes J. M., Evidence for stratosphere sudden warming–ionosphere coupling due to vertically propagating tides, *Geophysical Research Letters*, 2010, Vol. 37, p. L11104, DOI: 10.1029/2010GL043560.
20. Polyakova A. S., Chernigovskaya M. A., Perevalova N. P., Ionospheric effects of sudden stratospheric warmings in eastern Siberia region, *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2014, Vol. 120, pp. 15–23, DOI: 10.1016/j.jastp.2014.08.011.
21. 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.
22. 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, p. 18, DOI: 10.1186/s40623-015-0187-1.
23. 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.
24. Yasyukevich A. S., Chernigovskaya M. A., Mylnikova A. A., Shpynev B. G., Khabituev D. S., Seasonal and helio-geomagnetic activity pattern of the ionospheric variability over Russia's Eastern Siberia and Far East region from the GPS/GLONASS data, *2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium — Spring* (*PIERS*), St. Petersburg, 2017, pp. 2015–2022, DOI: 10.1109/PIERS.2017.8262081.
25. Zolotukhina N., Polekh N., Pirog O., Variability of the ionosphere over Irkutsk at low solar activity, *Advances in Space Research*, 2011, Vol. 48, No. 10, pp. 1606–1612, DOI: 10.1016/j.asr.2011.08.006.
26. Yiğit E., Medvedev A. S., Internal waves coupling processes in Earth's atmosphere, *Advances in Space Research*, 2015, Vol. 55, pp. 983–1003, DOI: 10.1016/j.asr.2014.11.020.