

Пространственные вариации параметров ионосферы северного полушария над зимними струйными течениями

Б.Г. Шпынев¹, М.А. Черниговская¹, В.И. Куркин¹, К.Г. Ратовский¹,
А.Ю. Белинская², А.Е. Степанов³, В.В. Бычков⁴, С.А. Григорьева⁵,
В.А. Панченко⁶, Н.А. Коренькова⁷, В.С. Лещенко⁷, И. Мелич⁸

¹*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия*

E-mail: shpynev@iszf.irk.ru

²*Геофизическая служба СО РАН, Алтай-Саянский филиал, Новосибирск, Россия*

³*Институт космофизических исследований и аэронавтики СО РАН, Якутск, Россия*

⁴*Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН
Паратунка, Россия*

⁵*Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия*

⁶*Институт земного магнетизма и распространения радиоволн РАН, Москва, Россия*

⁷*КФ Институт земного магнетизма и распространения радиоволн РАН*

Калининград, Россия

⁸*Институт атмосферной физики им. Лейбница, Кюлунгсборн, Германия*

Выполнен анализ влияния динамических процессов в нейтральной атмосфере на среднеширотную и субполярную ионосферу во время развития зимних струйных течений на высотах стратосферы и нижней мезосферы в северном полушарии в 2008–2013 гг. Для исследования динамики струйных течений использовались данные реанализа ECMWF Era Interim. Анализ глобального отклика ионосферы на стратосферную динамику проводился на основе данных цепочки ионозондов, расположенных в диапазоне широт ~50–60° с.ш. в долготном секторе 0–158° в.д. через 15–20° по долготе и охватывающих весь Евразийский континент. По данным распределенной цепочки ионозондов выявлены региональные особенности реакции ионосферы на высотах F2-слоя, связанные с развитием и трансформацией в течение зимы циркумполярного вихря на высотах страто-мезосферы. Основным механизмом воздействия снизу на ионосферу средних и субполярных широт рассматривалось изменение концентрации молекулярного газа в нижней термосфере. Нерегулярные вариации параметров ионосферы также могли быть вызваны волновыми возмущениями различных пространственно-временных масштабов (в том числе, внутренними гравитационными волнами), распространяющимися в термосферу из нижележащей атмосферы. Источник генерации среднемасштабных волн на высотах страто-мезосферы связан с развитием неустойчивостей в пространственно неоднородном, высокоскоростном зимнем струйном течении. Отмечено существенное повышение волновой активности на высотах страто-мезосферы с ноября по февраль для всех анализируемых лет. Вариации ионосферных параметров, наблюдавшиеся на разных долготах северного полушария, существенно зависели от положения ионозондов относительно преобладающего зимнего струйного течения в страто-мезосфере. Разница в значениях критических частот для ионозондов, разнесенных по долготе всего на 15–20 градусов, могла достигать 1,5–2 МГц в зависимости от расположения пункта наблюдения под струйным течением или вне его, т.е. проявлялся так называемый долготный эффект.

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

Одобрена к печати: 15.06.2016

DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-4-204-215

Введение

Динамические процессы в зимней нейтральной атмосфере высоких и средних широт на высотах стратосферы/нижней мезосферы во многом определяются крупномасштабными струйными течениями (СТ). СТ возникает на границе полярной ночи, где в течение зимы образуется наибольший температурный градиент в результате разницы в притоках тепла внутри и вне региона полярной ночи (освещенная и неосвещенная зоны). Длительная полярная ночь и низкие высоты Солнца зимой приводят к отрицательному радиационному балансу и сильному дополнительному радиационному охлаждению земной поверхности, поэтому температура нижней атмосферы существенно уменьшается. В результате формируется западное СТ со скоростями ветра, превышающими 120 м/с на высоте ~30 км.

Оно опоясывает полюс широкой полосой между 50° и 80° с.ш., формируя циркумполярный вихрь (ЦПВ). Чем больше разница температур, тем сильнее возникают градиенты давления и, следовательно, выше скорости ветра в СТ.

Принято считать, что основной причиной возмущений в зимнем ЦПВ, приводящих к его глобальным трансформациям, являются планетарные волны Россби (Matsuno, 1971), которые более эффективно генерируются в северном полушарии из-за наличия больших континентов с орографическими особенностями и контрастов нагрева суша/море. Зимой, когда в стратосфере устанавливается вихрь с направленными на восток ветрами, создаются благоприятные условия для распространения крупномасштабных планетарных волн из тропосферы в стратосферу. На стратосферных высотах эти волны взаимодействуют с преобладающим зональным потоком и возмущают стратосферный вихрь. Происходит обрушение волн на границах стратосферного вихря с образованием так называемой «зоны прибоя» (Abatzoglou, Magnusdottir, 2007). ЦПВ при этом замедляется или даже обращает движение на восточное, происходит его сплющивание и смещение от полюса к средним широтам или разделение на несколько вихрей циклонического и антициклонического типа. Такие глобальные динамические трансформации, происходящие в зимней стратосфере, часто связаны с событиями внезапных стратосферных потеплений (ВСП).

В работе (Shrynev et al., 2015a) предложен иной физический механизм, ответственный за формирование ЦПВ, которым может являться охлаждение и опускание атмосферного газа во время полярной ночи при отсутствии освещенности и источников тепловой энергии. В этих условиях кинетическая энергия вихря постоянно возрастает за счет снижения гравитационного потенциала атмосферного газа. На уровне постоянного давления ЦПВ имеет структуру, подобную водовороту на поверхности воды. Внутри ЦПВ создаются условия для возникновения неустойчивостей бароклинного типа, которые генерируют атмосферные волны различных масштабов, в том числе и внутренние гравитационные волны (ВГВ). Эти волны могут распространяться вверх в мезосферу и нижнюю термосферу (Черниговская и др., 2014; Chernigovskaya et al., 2015), перенося с собой значительный вертикальный поток энергии. На высотах нижней термосферы ВГВ приводят к вариациям термодинамического режима и состава атмосферы, вызывая тем самым вариации ионосферных параметров. Волновые возмущения могут играть существенную роль и в самом процессе развития неустойчивости, осуществляя обратную связь через дополнительный нагрев вышележащих слоев атмосферы.

В ряде обзорных работ (Laštovička, 2006; Rishbeth, 2006; Vincent, 2009) показана важность исследований влияния различного рода волновых движений, возникающих в тропосфере и в стратосфере, на распределение параметров ионосферы. Если традиционно при рассмотрении процессов вертикальных связей нижней и средней атмосферы с верхней атмосферой и ионосферой ключевая роль отводилась распространению планетарных волн (Matsuno, 1971; Pogoreltsev et al., 2007; Pancheva et al., 2009), то роль приливов и гравитационных волн в осуществлении этих вертикальных связей ясна гораздо меньше (Pancheva, Mukhtarov, 2010; Goncharenko et al., 2010; Mukhtarov, Pancheva, 2011; Yiğit, Medvedev, 2015).

В работе (Gardner, Liu, 2010) показано, что перенос атмосферных составляющих посредством распространяющихся вверх ВГВ приводит к изменению состава атмосферы. Зимняя полярная стратосфера часто является зоной нагрева и, вероятно, может генерировать ВГВ, которые, распространяясь вверх, вызывают вертикальный перенос компонентов атмосферы в мезосферу и нижнюю термосферу и, как следствие, приводят к фонтанному выносу молекулярного газа на высоты нижней термосферы.

Данные и методика анализа

Для исследования ионосферных эффектов зимних высокоскоростных струйных течений на высотах стратосферы и нижней мезосферы мы анализировали:

- данные архива реанализа ECMWF ERA-Interim для описания полей метеопараметров средней атмосферы (<http://www.ecmwf.int/en/research/climate-reanalysis/era-interim>);
- данные цепочки из 9 российских и европейских ионозондов (*табл. 1*) за зимние периоды 2008–2013 гг. Ионозонды располагались в диапазоне широт $\sim 50\text{--}60^\circ$ с.ш. в долготном секторе $0\text{--}158^\circ$ в.д. через $15\text{--}20^\circ$ по долготе и охватывали весь Евразийский континент (*рис. 1*).

Таблица 1. Ионозонды среднеширотной цепочки

<i>Расположение ионозонда</i>	<i>Обозначение</i>	<i>Географические координаты</i>	<i>Тип ионозонда</i>
Чилтон	CHL	$51,5^\circ$ с.ш., $0,6^\circ$ з.д.	DPS-4
Юлиусру	JLR	$54,6^\circ$ с.ш., $13,4^\circ$ в.д.	DPS-4
Калининград	KAL	$54,7^\circ$ с.ш., $20,6^\circ$ в.д.	Парус
Москва	MSK	$55,5^\circ$ с.ш., $37,3^\circ$ в.д.	DPS-4
Екатеринбург	EKB	$56,5^\circ$ с.ш., $60,4^\circ$ в.д.	Парус
Новосибирск	NSK	$54,6^\circ$ с.ш., $83,2^\circ$ в.д.	АИС
Иркутск	IRK	$52,2^\circ$ с.ш., $104,2^\circ$ в.д.	DPS-4
Якутск	YAK	62° с.ш., $129,7^\circ$ в.д.	DPS-4
Паратунка	PAR	$52,7^\circ$ с.ш. $158,2^\circ$ в.д.	АИС

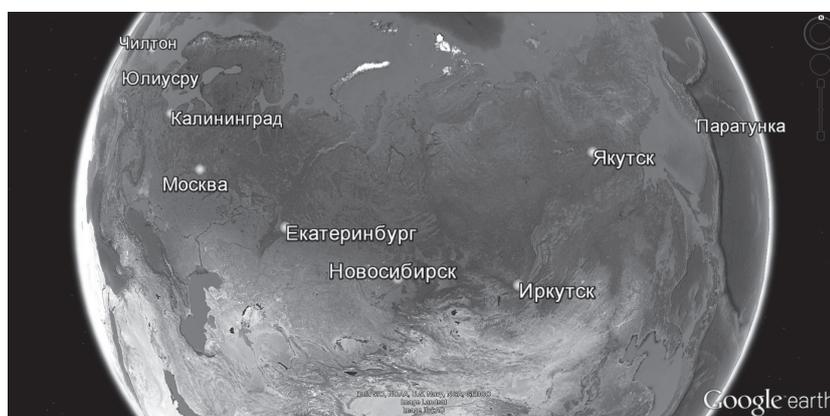


Рис. 1. Схема расположения широтной цепочки российских и европейских ионозондов

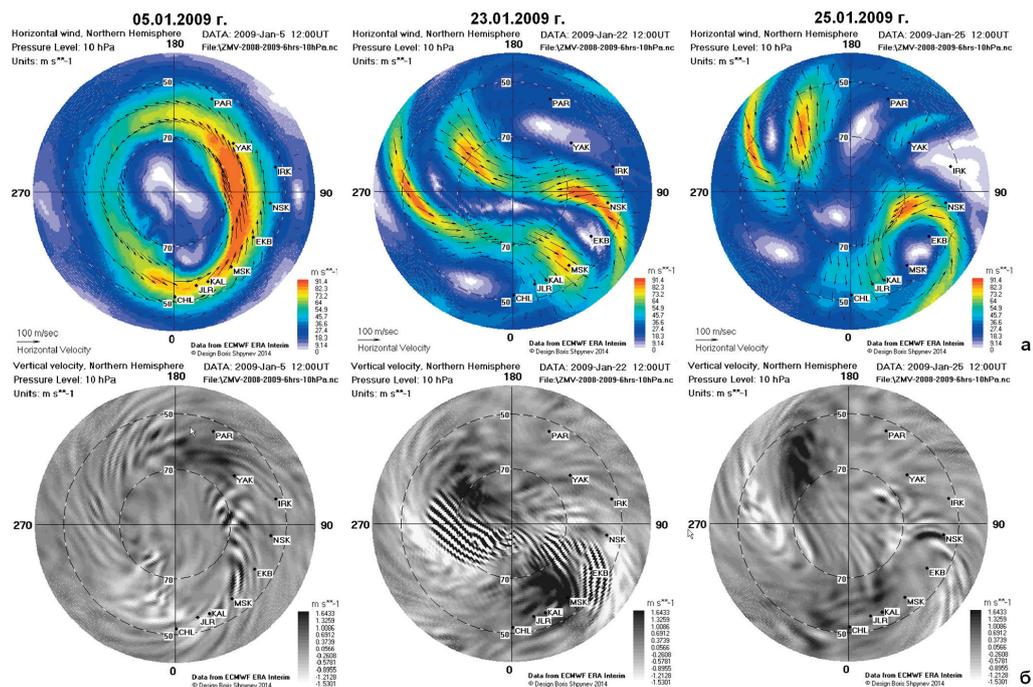


Рис. 2. Стратосферное СТ (поле горизонтальных скоростей, м/с) (а) и среднемасштабные волновые движения, связанные со СТ (поле вертикальных скоростей, Па/с) (б) на уровне 10 гПа (~30 км) для отдельных дней января 2009 г.

На основе данных архива реанализа ECMWF ERA-Interim (Dee et al., 2011), позволяющих исследовать трехмерные поля скоростей атмосферного газа на высотах стратосферы и нижней мезосферы с разрешением ~80 км ($0,75^\circ$ по долготе и широте) на 60 вертикальных уровнях от поверхности Земли до 0,1 гПа (~65 км), были выявлены периоды формирования зимних ЦПВ на высотах стратосферы и нижней мезосферы с ноября по февраль для всех анализируемых лет. С этими струйными течениями, локализованными на широтах $50\text{--}80^\circ$ с.ш. (рис. 2а), ассоциированы среднемасштабные волновые движения в поле вертикальных скоростей атмосферного газа (рис. 2б). Рисунок 2 демонстрирует картину трансформаций Арктического полярного вихря в январе 2009 г., когда было зарегистрировано рекордное за всю историю наблюдений стратосферное потепление типа «major» (максимум температуры на уровне 10 гПа отмечен 24.01.2009 г.). С его развитием в конце января 2009 г. (период минимума солнечной активности) ЦПВ разделился на 4 вихря: 2 циклонических и 2 антициклонических. Из рис. 2 также можно отметить, что ионозонды с течением времени располагались под различными зонами стратосферной циркуляции.

Известно, что доминирующим фактором в термодинамическом режиме ионосферы является гелио-геомагнитная активность. Поэтому для эффективного разделения источников регистрируемых ионосферных возмущений при анализе учитывалась сопутствующая гелио-геомагнитная возмущенность (поток солнечного радиоизлучения $F_{10.7}$ на длине 10,7 см в ед. 10^{-22} Вт/(Гц·м²) и геомагнитные индексы K_p). Период 2008–2010 гг. характеризовался продолжительным минимумом солнечной активности с $F_{10.7} \sim 70$ с низкой интенсивностью сопутствующих геомагнитных возмущений (рис. 3). В 2011–2013 гг. начался рост солнечной активности до умеренного уровня с $F_{10.7} \sim 180$.

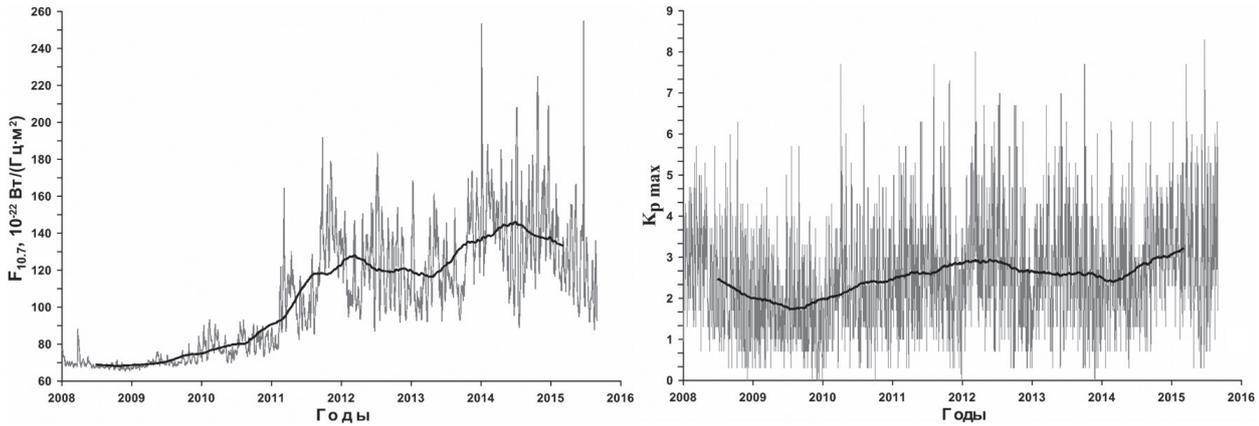


Рис. 3. Временные вариации солнечной и геомагнитной активности

Для описания особенностей нерегулярной структуры ионосферы использовались среднедневные и средненочные значения критической частоты f_oF2 и высоты максимума ионизации h_mF2 , рассчитанные путем усреднения внутри шестичасового интервала локального времени с центром в 12 LT и 00 LT.

Дополнительно для сравнения пространственно-временных вариаций ионосферных параметров по данным среднеширотной цепочки ионозондов строились долготно-временные карты отклонений f_oF2 и h_mF2 относительно «фонового уровня». Фоновые величины $\langle f_oF2 \rangle(t)$ вычислялись путем усреднения значений $f_oF2(t)$ скользящим средним на интервале сглаживания $(t-14, t+14)$ дней до и после каждого часа текущего дня t . Затем из временных рядов ежечасовых исходных данных критических частот $F2$ -слоя рассчитывались ряды отклонений от фонового уровня

$$\Delta f_oF2(t) = f_oF2(t) - \langle f_oF2 \rangle(t), \quad \langle f_oF2 \rangle(t) = \frac{1}{29} \sum_{i=-14}^{i+14} (f_oF2)_i(t).$$

Аналогичным образом получались ряды отклонений от фонового уровня для высоты максимума ионизации h_mF2 .

Результаты анализа и обсуждение

Ранее анализ временных вариаций ионосферных параметров для события ВСП января 2009 г. был выполнен по данным ионозондов, расположенных в азиатской части России (Шпынев и др., 2013; Shpynev et al., 2015). В настоящем исследовании мы включили в анализ данные измерений европейских ионозондов, что позволило более детально исследовать вариации ионосферного отклика, вызванного метеорологическими возмущениями в нижележащей атмосфере. Для примера рассмотрим вариации среднедневных значений критической частоты f_oF2 и высоты максимума ионизации h_mF2 для декабря 2012 г. – января 2013 г. по данным расширенной цепочки ионозондов (рис. 4а). В этот период разви-

валось одно из сильнейших и продолжительных ВСП типа «major», хотя оно было слабее, чем рекордное по повышению температуры ВСП января 2009 г. (Goncharenko et al., 2013). С развитием потепления в начале января 2013 г. (максимум температуры на уровне 10 гПа отмечен 06.01.2013 г.) Арктический ЦПВ разделился на 3 вихря: 2 вихря циклонического типа – над Канадой и западной и центральной частью Евразийского континента, и вихрь антициклонического типа – над Сибирью и Дальним Востоком Евразийского континента. Рисунок 4б демонстрирует картину трансформаций Арктического вихря для отдельных дней зимы 2012–13 гг. Эти же дни отмечены пунктиром на графиках для временных вариаций ионосферных параметров. Рассматриваемый период характеризовался возрастанием уровня солнечной активности $F_{10.7} = 100 \div 170$.

Принято считать, что в условиях минимума солнечной активности воздействие метеорологических факторов на ионосферу значительно эффективнее благодаря более низкой фоновой электронной плотности ионосферы. Ситуация менее ясна для условий высокой солнечной активности. Результаты численных моделирования (Maute et al., 2012; Liu, Richmond, 2013; Pedatella, Liu, 2013), указывают на существенное ослабление реакции ионосферы на воздействия волновых возмущений снизу (главным образом на приливные волны) с увеличением солнечной активности. Однако результаты экспериментальных исследований последних лет (Goncharenko et al., 2013; Polyakova et al., 2014; Shpynev et al., 2015) показывают, что воздействия нижележащей атмосферы могут играть существенную роль в ионосферной изменчивости не только в период низкой солнечной активности, но также во время периода роста активности от умеренной до высокой.

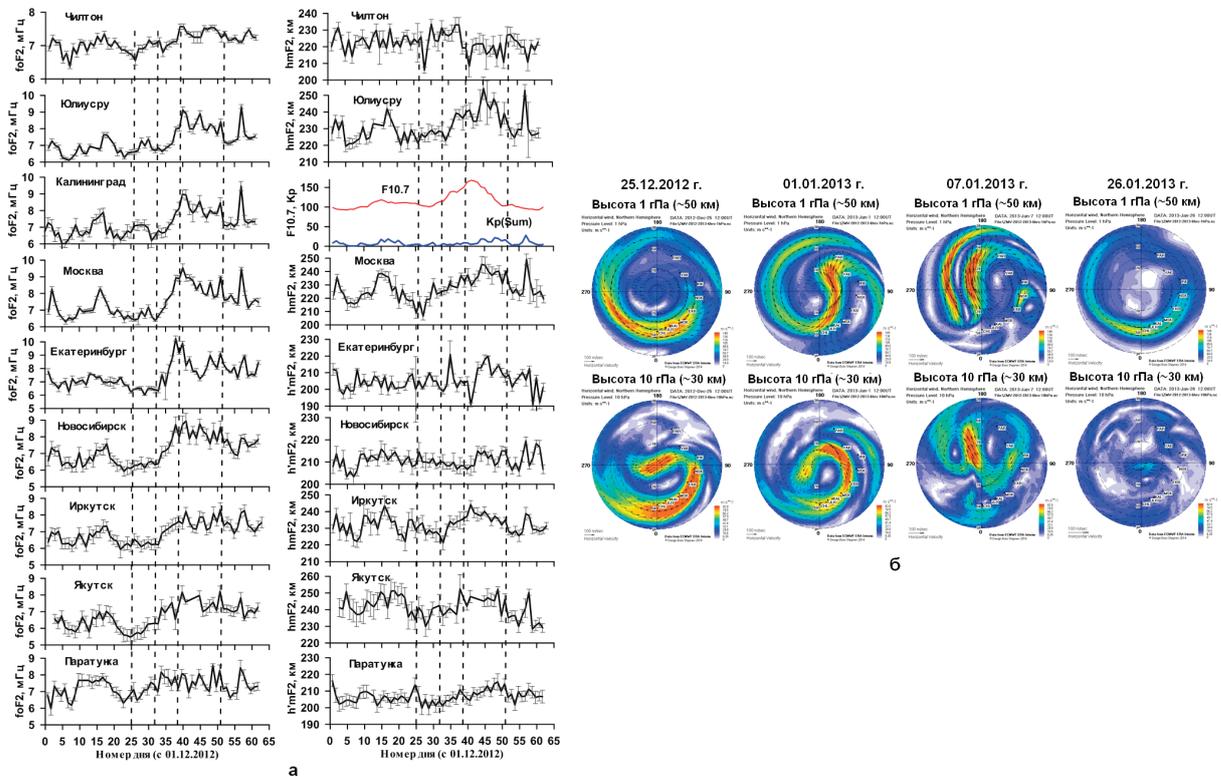


Рис. 4. Среднедневные значения $foF2$ и $hmF2$ по данным широтной цепочки ионозондов (а); поля горизонтальных скоростей газа в стратосфере на уровне 10 гПа (~30 км) и в нижней мезосфере на уровне 1 гПа (~50 км) для отдельных дней зимы 2012–2013 гг. (б)

Для наглядности сравнения на *рис. 5* приведена картина пространственно-временных вариаций параметров ионосферы по данным среднеширотной цепочки ионозондов относительно фонового уровня для декабря 2012 г. – января 2013 г.

При схожести, в целом, характера временных вариаций среднедневных значений f_oF2 и h_mF2 по данным цепочки ионозондов для зимы 2012–13 гг. (*рис. 4а*), можно заметить проявления существенных региональных особенностей. Изменения ионосферных параметров для регионально близкорасположенных ионозондов могли происходить в противоположных направлениях (для одной станции – возрастание, для другой – снижение). Такой характер вариаций параметров ионосферы невозможно объяснить изменениями гелио- или геомагнитной возмущенности, поскольку общепринято считать, что рост или спад уровня солнечной или геомагнитной активности приводит к подобным вариациям ионосферных параметров для всех ионозондов среднеширотной цепочки. Разница в значениях критических частот f_oF2 для станций, разнесенных всего на 15–20 градусов по долготе, могла достигать 1,5–2 МГц, если одна станция расположена под струйным течением, а другая – вне его. К примеру, разница в значениях f_oF2 для ионозондов в Паратунке и Якутске 25.12.2012 г.; для ионозондов Чилтон и Юлиусру – 07.01.2013 г. и 26.01.2013 г.

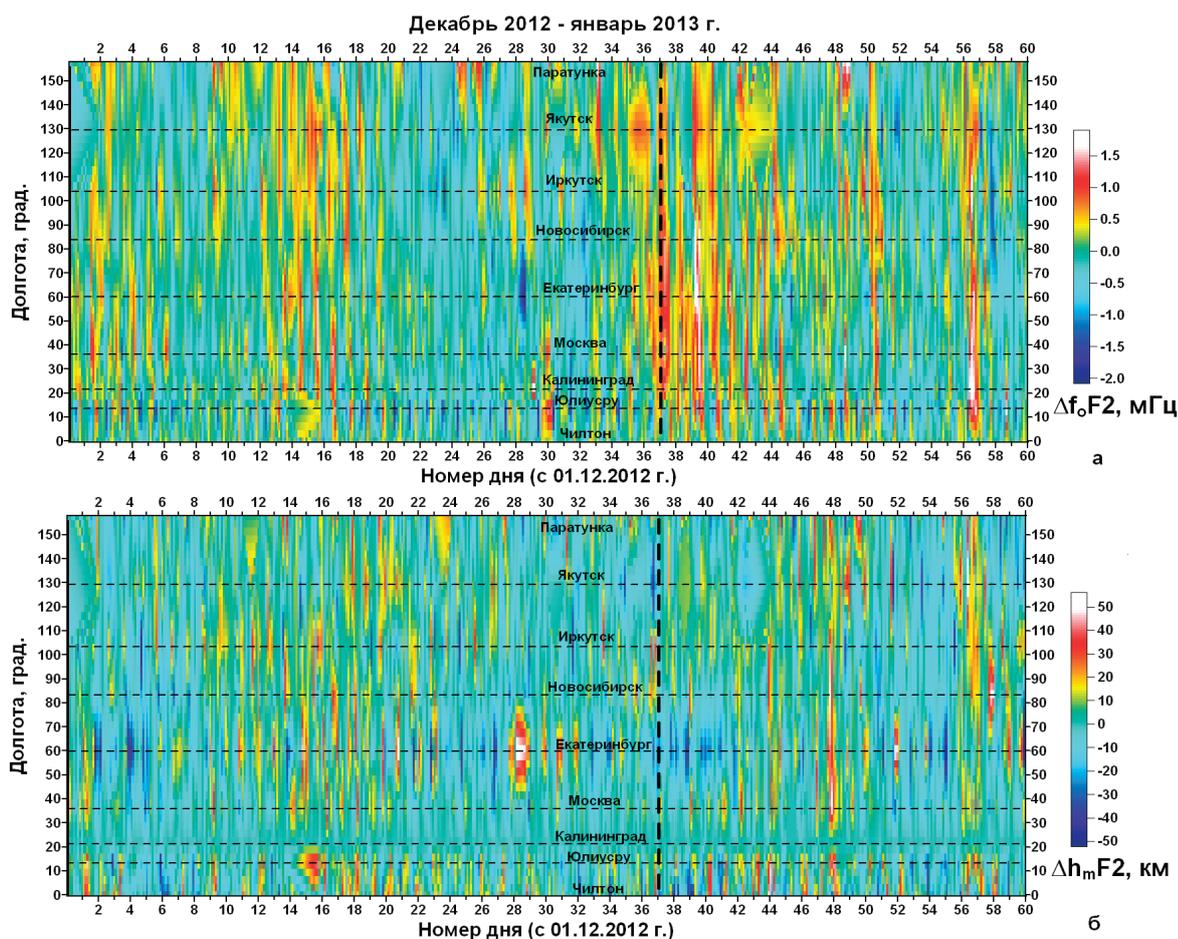


Рис. 5. Долготно-временные вариации отклонений от фонового уровня $\Delta f_oF2(t)$ и $\Delta h_mF2(t)$ для декабря-января 2012-13 гг. (пунктир – максимум ВСП 06.01.2013 г.)

По нашему мнению, значения ионосферных параметров, наблюдавшиеся на разных долготах в диапазоне 50–60° с.ш., существенно зависели от положения ионозондов относительно преобладающего зимнего СТ в стратосфере и нижней мезосфере. В качестве основного механизма воздействия снизу на ионосферу средних и субполярных широт в данном случае рассматривалось изменение состава нейтрального газа в нижней термосфере.

В работах (Prölss, Werner, 2002; Danilov, 2003; Liou et al., 2005; Laštovička, 2009; Bessarab et al., 2012) было показано, что увеличение концентрации молекулярного газа в нижней термосфере (приводящее к уменьшению отношения $[O^+]/[N_2]$) и поднятие границы между молекулярным и атомарным газом выражается в одновременном уменьшении критической частоты f_oF2 (и, следовательно, N_mF2) и увеличении высоты максимума h_mF2 . Из геофизической гидродинамики (Педлоски, 1984) известно, что над и под циклоническим вихрем создаются области низкого давления. За счет турбулентности, доминирующей в средней атмосфере, молекулярный газ с высот мезосферы/нижней термосферы увлекается страто-мезосферным циклоническим вихрем. В верхней атмосфере турбулентность затруднена из-за преобладания на этих высотах процессов молекулярной диффузии. Поэтому нейтральный газ в термосфере и в ионосфере формально не вовлечен в общий процесс атмосферной циркуляции. Опускание молекулярного газа из нижней термосферы в область активной циклонической циркуляции в мезосфере и стратосфере приводит к увеличению отношения $[O^+]/[N_2]$ на высотах термосферы и, следовательно, к увеличению электронной концентрации и уменьшению высоты максимума ионизации. Наоборот, над областью высокого давления в антициклоне подъем молекулярного газа из области активной циркуляции в стратосфере и мезосфере на высоты нижней термосферы приводит к уменьшению отношения $[O^+]/[N_2]$ и, следовательно, к уменьшению критической частоты и увеличению высоты максимума ионизации. Проникающие снизу волновые возмущения, генерируемые неустойчивостями СТ, также могут вызывать изменения термодинамического режима и состава атмосферы на уровне турбопаузы (105–110 км) (Gardner, Liu, 2010), которые затем проявляются в вариациях электронной концентрации на ионосферных высотах.

В нашем случае, с развитием ВСП в начале января 2013 г. и с разрушением стратосферного Арктического полярного вихря, ионозонды западной и центральной части Евразийского континента попали под область образовавшегося циклонического вихря (рис. 4б). Отток молекулярного газа из нижней термосферы в область циклонической циркуляции в страто-мезосфере привел к увеличению отношения $[O^+]/[N_2]$ на высотах термосферы. В связи с этим наблюдались небольшой рост f_oF2 и уменьшение высоты максимума ионизации для 01.01.2013 г. на ионозондах Чилтон, Юлиусру, Калининград, Москва с максимальным ростом f_oF2 до 10 мГц в Екатеринбурге для 07.01.2013 г. (рис. 4а и рис. 5). Ионозонды Сибири и Дальнего Востока оказались под зоной формирования стратосферного вихря антициклонического типа. Над областью высокого давления в антициклоне происходил подъем молекулярного газа из области циркуляции в страто-мезосфере на высоты нижней термосферы. Вследствие уменьшения отношения $[O^+]/[N_2]$ отмечались небольшое

снижение f_oF2 и рост высоты максимума ионизации по данным ионозондов Новосибирска, Иркутска, Якутска и Паратунки для 01.01.2013 г. Максимальное понижение f_oF2 и увеличение h_mF2 было зарегистрировано 07.01.2013 г. в Якутске и Паратунке (рис. 4а и рис. 5).

Результаты анализа и выводы

Выполненный в работе анализ временных вариаций ионосферных параметров с распределенной цепочки среднеширотных ионозондов, охватывающей весь Евразийский континент, позволил детально исследовать влияние глобальной структуры зимней страто-мезосферной циркуляции на долготные вариации параметров ионосферы. Выявлены региональные особенности реакции ионосферы на высотах $F2$ -слоя, связанные с развитием и трансформацией в течение зимы СТ на высотах страто-мезосферы, а также с распространяющимися снизу волновыми возмущениями различных пространственно-временных масштабов и интенсивности. Природа среднемасштабных волн связана с развитием неустойчивостей в пространственно неоднородном, высокоскоростном зимнем СТ на высотах средней атмосферы. Кроме этого, традиционно причинами возмущений в зимнем ЦПВ, приводящих к его глобальным трансформациям, считаются распространяющиеся из тропосферы планетарные волны Россби, которые интенсифицируются в периоды развития ВСП, взаимодействуют на высотах стратосферы с преобладающим зональным потоком, а также приливные вариации. В результате проведенного исследования получены следующие результаты:

1) Для всех анализируемых лет на высотах ионосферы отмечены проявления динамических эффектов, связанных с трансформациями в зимних высокоскоростных СТ и с развитием событий ВСП. Реакция ионосферы на эти эффекты зависела от положения ионозондов относительно зон циркуляции в ЦПВ на высотах страто-мезосферы.

2) Разница в значениях критических частот для ионозондов в диапазоне $\sim 50\text{--}60^\circ$ с.ш., разнесенных всего на $15\text{--}20^\circ$ по долготе, могла достигать $1,5\text{--}2$ МГц в зависимости от положения ионозондов относительно зон циркуляции в ЦПВ или вне зоны СТ, т.е. проявлялся так называемый долготный эффект.

3) В качестве основного механизма воздействия снизу на ионосферу средних и субполярных широт рассматривался процесс подъема/опускания молекулярного газа на высоты/с высот нижней термосферы в активных зонах страто-мезосферной циркуляции.

4) Воздействия нижележащей атмосферы вносили существенный вклад в ионосферную изменчивость не только в период низкой солнечной активности, но также во время периода роста активности от умеренной до высокой.

Авторы выражают благодарность Европейскому центру среднесрочных прогнозов погоды (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) за метеоданные архива реанализа ERA-Interim, использованные в настоящем исследовании. Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 15-05-05227-а и гранта № НШ-6894.2016.5 Президента РФ государственной поддержки ведущих научных школ РФ.

Литература

1. Педлоски Дж. Геофизическая гидродинамика: в 2 т. М.: Мир, 1984.
2. Черниговская М.А., Сутырина Е.Н., Ратовский К.Г. Метеорологические эффекты ионосферной возмущенности над Иркутском по данным вертикального радиозондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 2. С. 264–274.
3. Шпынев Б.Г., Панчева Д., Мухтаров П., Куркин В.И., Ратовский К.Г., Черниговская М.А., Белинская А.Ю., Степанов А.Е. Отклик ионосферы над регионом Восточной Сибири во время внезапного стратосферного потепления 2009 г. по данным наземного и спутникового радиозондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 1. С. 153–163.
4. Abatzoglou J.T., Magnusdottir G. Wave breaking along the stratospheric polar vortex as seen in ERA-40 data // Geophys. Res. Lett. 2007. Vol. 34. P. L08812. DOI:10.1029/2007GL029509.
5. Bessarab F.S., Korenkov Yu.N., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Karpov I.V., Ratovsky K.G., Chernigovskaya M.A., Shcherbakov A.A. Modeling the effect of Sudden Stratospheric Warming within the thermosphere-ionosphere system // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 2012. Vol. 90–91. P. 77–85.
6. Chernigovskaya M.A., Shpynev B.G., Ratovsky K.G. Meteorological effects of ionospheric disturbances from vertical radio sounding data // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 2015. Vol. 136. P. 235–243.
7. Danilov A.D. Long-term trends of foF2 independent on geomagnetic activity // Ann. Geophys. 2003. Vol. 21. No. 5. P. 1167–1176.
8. 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 // Q.J.R. Meteorol. Soc. 2011. Vol. 137. P. 553–597.
9. 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.
10. Goncharenko L., Chau J.L., Condor P., Coster A., Benkevitch L. Ionospheric effects of sudden stratospheric warming during moderate-to-high solar activity: Case study of January 2013 // Geophys. Res. Lett. 2013. Vol. 40. P. 1–5.
11. Goncharenko L.P., Chau J.L., Liu H.-L., Coster A.J. Unexpected connection between the stratosphere and ionosphere // Geophys. Res. Lett. 2010. Vol. 37. P. L10101. DOI:10.1029/2010GL043125.
12. Laštovička J. Forcing of the ionosphere by waves from below // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 2006. Vol. 68. P. 479–497.
13. Laštovička J. Global pattern of trends in the upper atmosphere and ionosphere: Recent progress // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 2009. Vol. 71. No. 14–15. P. 1514–1528.
14. 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. Geophys. Res. 2005. Vol. 110. P. A05309. DOI:10.1029/2004JA010840.
15. Liu H.-L., Richmond A.D. Attribution of ionospheric vertical plasma drift perturbations to large-scale waves and the dependence on solar activity // J. Geophys. Res.: Space Physics. 2013. Vol. 118. P. 2452–2465.
16. Matsuno T. A dynamical model of the stratospheric sudden warming // J. Atmos. Sci. 1971. Vol. 28. P. 1479–1494.
17. Maute A., Richmond A.D., Roble R.G. Sources of low-latitude ionospheric ExB drifts and their variability // J. Geophys. Res., 2012. Vol. 117. A06312. DOI:10.1029/2011JA017502.
18. Mukhtarov P., Pancheva D. Global ionospheric response to nonmigrating DE3 and DE2 tides forced from below // J. Geophys. Res.: Space Physics (1978–2012). 2011. Vol. 116. A05323. DOI:10.1029/2010JA016099.
19. Pancheva D., Mukhtarov P. Strong evidence for the tidal control on the longitudinal structure of the ionospheric F-region // Geophys. Res. Lett. 2010. Vol. 37. L14105. DOI:10.1029/2010GL044039.
20. Pancheva D., Mukhtarov P., Andonov B., Mitchell N.J., Forbes J. Planetary waves observed by TIMED/SABER in coupling the stratosphere-mesosphere-lower thermosphere during the winter of 2003/2004: Part 2 – Altitude and latitude planetary wave structures // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 2009. V. 71. No. 1. P. 75–87.
21. Pedatella N.M., Liu H.-L. The influence of atmospheric tide and planetary wave variability during sudden stratosphere warmings on the low latitude ionosphere // J. Geophys. Res.: Space Physics. 2013. Vol. 118. P. 5333–5347.
22. Pogoreltsev A.I., Vlasov A.A., Fröhlich K., Jacobi Ch. Planetary waves in coupling the lower and upper atmosphere // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 2007. Vol. 69. P. 2083–2101. DOI:10.1016/j.jastp.2007.05.014.
23. Polyakova A.S., Chernigovskaya M.A., Perevalova N.P. Ionospheric effects of sudden stratospheric warmings in eastern Siberia region // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 2014. Vol. 120. P. 15–23.
24. Prölss G.W., Werner S. Vibrationally excited nitrogen and oxygen and the origin of negative ionospheric storms // J. Geophys. Res. 2002. Vol. 107. No. A2. P. 1016. DOI:10.1029/2001JA900126.
25. Rishbeth H. F-region links with the low atmosphere? // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 2006. Vol. 68. P. 469–478.
26. Shpynev B.G., Churilov S.M., Chernigovskaya M.A. Generation of waves by jet-stream instabilities in winter polar stratosphere/mesosphere // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 2015. Vol. 136. P. 201–215.
27. 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. 67:18. DOI:10.1186/s40623-015-0187-1.
28. 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.
29. Yiğit E., Medvedev A.S. Internal waves coupling processes in Earth's atmosphere // Adv. Space Res. 2015. Vol. 55. P. 983–1003.

Spatial variations of the ionosphere parameters over the Northern Hemisphere winter jet streams

B.G. Shpynev¹, M.A. Chernigovskaya¹, V.I. Kurkin¹, K.G. Ratovsky¹,
A.Yu. Belinskaya², A.E. Stepanov³, V.V. Bychkov⁴, S.A. Grigorieva⁵,
V.A. Panchenko⁶, N.A. Korenkova⁷, V.S. Leschenko⁷, J. Mielich⁸

¹*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia*

E-mail: shpynev@iszf.irk.ru

²*Geophysical Survey SB RAS, Altay-Sayan Department, Novosibirsk, Russia*

³*Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS, Yakutsk, Russia*

⁴*Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS
Paratunka, Russia*

⁵*Institute of Geophysics UB RAS, Yekaterinburg, Russia*

⁶*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS
Moscow, Russia*

⁷*West Department of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism Ionosphere and Radio Wave
Propagation RAS, Kaliningrad, Russia*

⁸*Leibniz Institute for Atmospheric Physics, Kühlungsborn, Germany*

We study the effects of neutral atmosphere dynamics influence on midlatitude and sub-polar ionosphere during the formation and evolution of the winter jet stream at the heights of the stratosphere/lower mesosphere in the Northern Hemisphere during years 2008-2013. To analyze the dynamics of the stratosphere/lower mesosphere jet streams we use the ECMWF Era-Interim reanalysis data. The analysis of the global ionosphere response to the strato-mesospheric dynamics is based on the data of the ionosonde chain located within the latitude range of 50-60 N in the longitudinal sector 0-158 E spaced at 15-20 degrees in longitude and covering the entire Eurasian continent. We reveal the regional features of the F2-layer ionosphere response to the dynamic processes during the developing of winter circumpolar vortex at the strato-mesosphere. As a mechanism of the neutral atmosphere impact to the ionosphere, we consider the uplifting/lowering molecular gas to/from lower thermosphere in active regions of circulations. Irregular variations of the ionosphere parameters can also be caused by wave disturbances of various spatial and temporal scales (including internal gravity waves) propagating in the thermosphere from the lower atmosphere. The source of the mesoscale waves generation at the strato-mesosphere heights is associated with the baroclinic instabilities in the spatially non-uniform, high-speed winter jet stream. We identify the periods of middle-scale wave-like motions in the atmosphere and ionosphere in the autumn-winter period (between November and February) for all years under analysis. Variations of the ionosphere parameters observed at different longitudes of the northern hemisphere significantly depend on the ionosonde position relatively to the winter jet stream zone in the strato-mesosphere. The difference in the critical frequency values for the ionosondes spaced longitudinally by only 15-20 degrees can reach about 1.5-2 MHz, depending on the location of the observation point under the jet stream or outside it.

Keywords: the upper and middle atmosphere, interaction between atmospheric layers, wave disturbances

Accepted: 15.06.2016

DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-4-204-215

References

1. Pedlosky J., *Geophysical Fluid Dynamics*, New York: Springer-Verlag, 1982, 624 p.
2. Chernigovskaya M.A., Sutyryna E.N., Ratovsky K.G., Meteorologicheskie efekty ionosfernoi vozmushchennosti nad Irkutskom po dannym vertikal'nogo radiozondirovaniya (Meteorological effects of ionospheric disturbances over Irkutsk according to vertical radio sounding data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 2, pp. 264–274.
3. Shpynev B.G., Pancheva D., Mukhtarov P., Kurkin V.I., Ratovsky K.G., Chernigovskaya M.A., Belinskaya A.Yu., Stepanov A.E., Otklik ionosfery nad regionom Vostochnoi Sibiri vo vremya vnezapnogo stratosfernogo potepeleniya 2009 g. po dannym nazemnogo i sputnikovogo radiozondirovaniya (Ionosphere response over East Siberia during the 2009 Sudden Stratosphere Warming derived from data of ground based and satellite radio sounding), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 1, pp. 153–163.
4. Abatzoglou J.T., Magnusdottir G. Wave breaking along the stratospheric polar vortex as seen in ERA-40 data, *Geophys. Res. Lett.*, 2007, Vol. 34, L08812. DOI:10.1029/2007GL029509.
5. Bessarab F.S., Korenkov Yu.N., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Karpov I.V., Ratovsky K.G., Chernigovskaya M.A., Shcherbakov A.A., Modeling the effect of Sudden Stratospheric Warming within the thermosphere-ionosphere system, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 2012, Vol. 90–91, pp. 77–85.
6. Chernigovskaya M.A., Shpynev B.G., Ratovsky K.G., Meteorological effects of ionospheric disturbances from vertical radio sounding data, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 2015, Vol. 136, pp. 235–243.
7. Danilov A.D., Long-term trends of foF2 independent on geomagnetic activity, *Ann. Geophys.*, 2003, Vol. 21, No. 5, pp. 1167–1176.

8. 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, *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 2011, Vol. 137, pp. 553–597. DOI:10.1002/qj.828.
9. 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.
10. Goncharenko L., Chau J.L., Condor P., Coster A., Benkevitch L., Ionospheric effects of sudden stratospheric warming during moderate-to-high solar activity: Case study of January 2013, *Geophys. Res. Lett.*, 2013, Vol. 40, pp. 1–5.
11. Goncharenko L.P., Chau J.L., Liu H.-L., Coster A.J., Unexpected connection between the stratosphere and ionosphere, *Geophys. Res. Lett.*, 2010, Vol. 37, L10101. DOI:10.1029/2010GL043125.
12. Laštovička J., Forcing of the ionosphere by waves from below, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 2006, Vol. 68, pp. 479–497.
13. Laštovička J., Global pattern of trends in the upper atmosphere and ionosphere: Recent progress, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 2009, Vol. 71, No. 14–15, pp. 1514–1528.
14. 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. Geophys. Res.*, 2005, Vol. 110, pp. A05309. DOI:10.1029/2004JA010840.
15. Liu H.-L., Richmond A.D., Attribution of ionospheric vertical plasma drift perturbations to large-scale waves and the dependence on solar activity, *J. Geophys. Res.: Space Physics*, 2013, Vol. 118, pp. 2452–2465.
16. Matsuno T., A dynamical model of the stratospheric sudden warming, *J. Atmos. Sci.*, 1971, Vol. 28, pp. 1479–1494.
17. Maute A., Richmond A.D., Roble R.G., Sources of low-latitude ionospheric ExB drifts and their variability, *J. Geophys. Res.*, 2012, Vol. 117, A06312. DOI:10.1029/2011JA017502.
18. Mukhtarov P., Pancheva D., Global ionospheric response to nonmigrating DE3 and DE2 tides forced from below, *J. Geophys. Res.: Space Physics (1978–2012)*, 2011, Vol. 116, A05323. DOI:10.1029/2010JA016099.
19. Pancheva D., Mukhtarov P. Strong evidence for the tidal control on the longitudinal structure of the ionospheric F-region, *Geophys. Res. Lett.*, 2010, Vol. 37, L14105. DOI:10.1029/2010GL044039.
20. Pancheva D., Mukhtarov P., Andonov B., Mitchell N.J., Forbes J., Planetary waves observed by TIMED/SABER in coupling the stratosphere-mesosphere-lower thermosphere during the winter of 2003/2004: Part 2 – Altitude and latitude planetary wave structures, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 2009, V. 71, No. 1, pp. 75–87.
21. Pedatella N.M., Liu H.-L., The influence of atmospheric tide and planetary wave variability during sudden stratosphere warmings on the low latitude ionosphere, *J. Geophys. Res.: Space Physics*, 2013, Vol. 118, pp. 5333–5347.
22. Pogoreltsev A.I., Vlasov A.A., Fröhlich K., Jacobi Ch. Planetary waves in coupling the lower and upper atmosphere, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 2007, Vol. 69, pp. 2083–2101. DOI:10.1016/j.jastpp.2007.05.014.
23. Polyakova A.S., Chernigovskaya M.A., Perevalova N.P., Ionospheric effects of sudden stratospheric warmings in eastern Siberia region, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 2014, Vol. 120, pp. 15–23.
24. Prölss G.W., Werner S., Vibrationally excited nitrogen and oxygen and the origin of negative ionospheric storms, *J. Geophys. Res.*, 2002, Vol. 107, No. A2, pp. 1016. DOI:10.1029/2001JA900126.
25. Rishbeth H., F-region links with the low atmosphere? *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 2006, Vol. 68, pp. 469–478.
26. Shpynev B.G., Churilov S.M., Chernigovskaya M.A., Generation of waves by jet-stream instabilities in winter polar stratosphere/mesosphere, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 2015, Vol. 136, pp. 201–215.
27. 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. 67:18. DOI:10.1186/s40623-015-0187-1.
28. 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.
29. Yiğit E., Medvedev A.S., Internal waves coupling processes in Earth's atmosphere, *Adv. Space Res.*, 2015, Vol. 55, pp. 983–1003.