# Метеорологические эффекты ионосферной возмущенности над Иркутском по данным вертикального радиозондирования

### М.А. Черниговская, Е.Н. Сутырина, К.Г. Ратовский

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

В работе исследованы возмущения ионосферы, вызванные процессами, происходящими в слоях нижней и средней атмосферы, т.е. так называемые метеорологические эффекты в ионосфере. Ионосферные данные получены на основе непрерывных измерений на Иркутском ионозонде вертикального зондирования DPS-4 в 2008-2010 гг. Под ионосферными возмущениями понимались отклонения максимума электронной концентрации NmF2 от медианных значений. Использовались также данные архива реанализа NCEP/NCAR и спутниковые данные MLS Aura по температуре атмосферы на высотах стратосферы и верхней мезосферы за 2008-2010 гг. В результате анализа выявлены периоды крупномасштабных волновых движений в стратосфере на высоте 10 мб, преимущественно в холодное время года. Эти волновые движения ассоциированы со струйными течениями на высотах стратосферы, в основном, локализованными на широтах 50-80° с.ш. Пре-имущественно волны распространялись в широтном направлении на запад, но в определенные периоды имело место и меридиональное направление распространения волн. Крупномасштабные волновые движения в стратосферения в стратосфереными возмущений хорошо коррелировали скоростные и энергетические характеристики стратосферных струйных течений.

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

#### Введение

В работе исследованы метеорологические эффекты в ионосфере, т.е. возмущения ионосферных параметров, вызванные процессами, происходящими в нижележащих слоях нижней и средней атмосферы (тропосфере, стратосфере, мезосфере и нижней термосфере). Ионосфера Земли подвержена воздействию как сверху – солнечное электромагнитное и корпускулярное излучение, магнитосферное воздействие, так и снизу – со стороны нижележащих слоев (тропические и внетропические циклоны, фронтальные системы, струйные течения, грозы, стратосферные потепления, солнечный терминатор, землетрясения, извержения вулканов и т.д.). Определяющим фактором в термодинамическом режиме ионосферы является гелио-геомагнитная активность (Buonsanto, 1999). В то же время большое количество экспериментальных и теоретических исследований свидетельствуют о том, что возмущения в нижней и средней атмосфере могут служить источниками атмосферных волн (акустических, внутренних гравитационных (ВГВ) и планетарных), которые при определенных условиях проникают на высоты ионосферы и проявляются в виде перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) (Hocke, Schlegel, 1996; Vadas, 2007; Куницын и др., 2007; Онищенко, 2010).

Однако работ, посвященных анализу метеорологических эффектов в ионосфере, существенно меньше по сравнению с интенсивными исследованиями механизмов влияния

гелио-геомагнитных факторов. Установлено, что на средних широтах в условиях низкой солнечной и геомагнитной активности отмечаются существенные (до 15-20% и более) межсуточные вариации параметров ионосферы, вызывающие вариации характеристик ионосферного радиоканала. Следует отметить, что морфологические особенности ионосферных возмущений в спокойных гелио-геомагнитных условиях установлены на основе анализа крайне ограниченного набора параметров ионосферы и атмосферы, имеют сложный пространственно-временной характер и требуют дополнительного изучения.

В ряде обзорных работ (Kazimirovsky et al., 2003; Lastovicka, 2006; Rishbeth, 2006; Vincent, 2009) показана важность исследований влияния различного рода волновых движений, возникающих тропосфере и в стратосфере, на распределение параметров ионосферы на высотах 200-400 км, приведены корреляционные характеристики воздействия гравитационных и планетарных волн на изменения критических частот в F-области. Во множестве исследований показано существование связей между волновыми возмущениями в атмосфере и ионосфере и погодными явлениями, такими как грозы, торнадо, тропические циклоны и т.п. В работе (Prasad et al., 1975) авторы описывали квазисинусоидальные колебания, зарегистрированные во время сильных гроз. Авторы работ (Bishop et al., 2006; Mao et al., 2010; Polyakova, Perevalova, 2011; Черниговская и др., 2012) обнаружили среднемасштабные и крупномасштабные ПИВ на высотах F-области ионосферы в периоды развития тропических циклонов. Регистрировались также и другие ионосферные эффекты метеорологических возмущений: инфразвуковые колебания, электрические поля, нагрев, оптические эмиссии, появление рассеяния в области F ионосферы (Martinis, Manzano, 1999; Šauli, Boška, 2001; Šindelářová et al., 2009). Источниками ВГВ могут быть и струйные течения (СТ) – сильные узкие потоки с почти горизонтальной осью в верхней тропосфере (9-12 км) или нижней стратосфере (25-30 км), характеризующиеся большими вертикальными и горизонтальными сдвигами ветра (Bertin et al., 1978; Thomas et al., 1999; Fritts, Alexander, 2003; Plougonven, Snyder, 2007).

Целью работы было выявление эффектов СТ в вариациях параметров ионосферы в условиях минимума солнечной активности в 2008-2010 гг. над регионом г. Иркутск.

### Используемые данные

Первые результаты анализа, направленного на выявление эффектов струйных течений в вариациях параметров ионосферы по данным вертикального радиозондирования на Иркутском ионозонде для 2009 г., приведены в работе (Черниговская и др., 2013).

В настоящей работе для исследования использовались:

– четырехсрочные данные архива реанализа NCEP/NCAR за 2008-2010 гг., содержащие массивы значений зональной и меридиональной компонент вектора горизонтальной скорости ветра, а также производной давления по времени на высотах 10, 100, 200 и 850 мб (30, 16, 12 и 2 км, соответственно). Данные находятся в свободном доступе на сайте ESRL (The Earth System Research Laboratory http://www.esrl.noaa.gov/);

ионосферные данные о максимуме электронной концентрации NmF2, получен ные на основе непрерывных измерений на Иркутском ионозонде вертикального зондирования DPS-4 (52° с.ш., 104° в.д.).

Как подчеркивалось выше, доминирующим фактором в термодинамическом режиме ионосферы является гелио-геомагнитная активность. Поэтому для эффективного разделения возмущений при анализе учитывалась сопутствующая гелио-геомагнитная возмущенность (поток солнечного радиоизлучения  $F_{10.7}$  на длине 10,7 см в ед.  $10^{-22}$  Bt/(Гц·м<sup>2</sup>) и геомагнитный индекс  $K_p$ ). Особенностью рассматриваемых 2008-2010 гг. являлось то, что они характеризовались минимумом солнечной активности с низкой интенсивностью активных событий на Солнце и сопутствующих им геомагнитных возмущений (*puc. 1*). Это чрезвычайно благоприятствовало эффективности исследования ионосферных возмущений, связанных с влиянием внутренних атмосферных процессов (в том числе метеорологических эффектов).



Рис. 1. Временные вариации солнечной и геомагнитной активности

Для описания волновой активности на высотах стратосферы использовался параметр  $\Omega$  (Па/с), характеризующий изменения барического поля на высоте 10 мб на текущий срок наблюдения

$$\Omega = (dp/dt)_{max} - (dp/dt)_{min}, \tag{1}$$

вычисляющийся как разность максимального и минимального значения *dp/dt* отдельно для всего северного полушария, для северо-восточной четверти (СВ квадранта) земного

шара, для области 10\*10 град. над Иркутском и для диапазона широт 40-90° с.ш. на долготе 102,5° в.д. Наиболее резкие периодические изменения барического поля для высоких широт обусловлены на данной высоте, в первую очередь, волновыми возмущениями, что дает основание использовать в рамках данного исследования указанный параметр для оценки интенсивности волновых движений.

В качестве характеристики ионосферной возмущенности был выбран коэффициент вариаций максимума электронной концентрации. Индекс *VrNmF2* представляет собой нормированную дисперсию *NmF2* в дневное время:

$$VrNmF2 = 100\% \cdot \sqrt{\left\langle \left(NmF2 - \left\langle NmF2 \right\rangle\right)^2 \right\rangle} / \left\langle NmF2 \right\rangle, \tag{2}$$

где  $\langle \rangle$  означает усреднение по времени на интервале 09-15 LT. Из определения видно, что индекс *VrNmF2* пропорционален амплитуде вариаций *NmF2* в диапазоне периодов  $T \leq 6$  часов. Таким образом, индекс *VrNmF2* отражает ВГВ-активность на высотах F2-слоя ионосферы.

### Результаты анализа данных

В результате обработки данных реанализа NCEP/NCAR выявлены крупномасштабные волновые движения в стратосфере на высоте 10 мб (~ 30 км) в зимние сезоны (ноябрь-февраль) всех анализируемых лет. Эти волны могли быть ассоциированы со струйными течениями на уровнях стратосферы и тропосферы. На *рис. 2* для примера приведены положения стратосферного струйного течения и ассоциированные с ним крупномасштабные волновые движения в стратосфере на изобарической поверхности 10 мб в северном полушарии для отдельных дней января-февраля 2008 г. Аналогичные рисунки для 2009 г. приведены в работе (Черниговская и др., 2013).

Стратосферные СТ образовывались на границе полярной ночи, где наибольший температурный градиент существовал как результат различий радиационного охлаждения внутри и снаружи этой зоны в течение зимы. Наибольшие горизонтальные градиенты температуры создавались между 50 и 80°с.ш. В результате формировалось преимущественно западное стратосферное СТ со скоростями ветра, превышающими 120 м/с (более 400 км/ч) на высоте порядка 30 км. Оно опоясывало Арктику, располагаясь широкой полосой в той области, где возникали наибольшие контрасты температур. В среднем длина волн составляла 1,5 тыс. км. Генетически связанное с периферией зимнего циркумполярного циклона СТ меняло свое положение и интенсивность в связи с режимом циклона. Оно смещалось далеко в умеренные широты в вершинах планетарных стратосферных ложбин. В стратосфере центральной Арктики наблюдались более слабые ветры, чем в пе-

риферийных районах, где имели место наибольшие температурные контрасты между стратосферой умеренных широт, освещаемой Солнцем, и арктической стратосферой, находящейся в земной тени.



Рис. 2. Стратосферное струйное течение (1-й и 3-й ряды) и ассоциированные с ним крупномасштабные волновые движения в стратосфере на 10 мб (2-й и 4-й ряды) в северном полушарии для 2, 10, 18, 20, 25, 29 января и 2, 6, 14, 29 февраля 2008 г. (сверху и слева, соответственно)

Зимой всех анализируемых лет (во второй половине января и в феврале 2008 г., в январе 2009 г. и в январе 2010 г.) над северным полушарием развивались очень интенсивные внезапные стратосферные потепления (ВСП) типа "major" (Labitzke, van Loon, 1999) (*puc. 3*). Известно, что ВСП характеризуются сильными и внезапными повышениями температуры "взрывного характера" на десятки градусов в зимней стратосфере в течение нескольких суток, сопровождающиеся опусканием значительной области стратосферы на 10-30 км вниз. С началом ВСП типа "major" нарушается обычная для зимы схема циркуляции в стратосфере с направленным на запад циркумполярным вихрем, центр которого мигрирует вблизи полюса. В период развития ВСП сильное возмущение из тропосферы, например обширный и мощный антициклон, распространяется вверх, возмущает СТ по-

лярной ночи, заметно ослабляет западные ветры и даже может обратить их. При этом меняется знак меридионального градиента температуры над полушарием, на некоторое время в полярной области может установиться стратосферный антициклон, и направление общего переноса воздуха изменяется с западного на восточный. Когда это происходит, воздух в стратосфере начинает втягиваться в центр вихря и сжиматься. Вследствие сжатия происходит его разогрев, начинается ВСП и активизация вертикальной циркуляции.



Рис. 3. Высотно-временные распределения температуры в страто-мезосфере по данным спутниковых измерений MLS Aura для периодов развития ВСП в январе-феврале 2008 г. (а), в январе 2009 г. (б) и в январе 2010 г. (в)

Из *рис. 4* видно, что, действительно, в периоды усиления стратосферной волновой активности, ассоциированной со стратосферными СТ, наблюдалось заметное повышение ВГВ-активности на высотах *F2*-слоя ионосферы (показано овалами). Средние значения *VrNmF2* возрастали по сравнению с невозмущенными значениями в летние месяцы года более, чем в 2 раза. С повышениями уровня геомагнитной возмущенности (второй сверху график), которая также могла быть причиной повышения волновой возмущенности на высотах ионосферы, связаны лишь отдельные пики в величине коэффициента вариации максимума электронной концентрации в F2-слое ионосферы. Корреляция между индексами *VrNmF2* и  $K_p$  наблюдалась только фрагментарно, таким образом, существенные повыше-

ния ионосферной ВГВ-активности в зимние месяцы анализируемых лет нельзя объяснить лишь повышениями геомагнитной активности.



Рис. 4. Временные изменения коэффициента вариации VrNmF2 над Иркутском, максимального за сутки геомагнитного индекса Кр, спутниковой температуры MLS Aura для дневных и ночных условий на высотах порядка 80 и 30 км над регионом Иркутска в 2008-2010 гг.

Возмущения в ионосфере (вариации электронной концентрации в F-области) могли быть также обусловлены вариациями температуры в нижележащей атмосфере (стратосфере, мезосфере). Мы проанализировали временные вариации температуры на высотах стратосферы (~30 км) и мезосферы (~80 км) по данным измерений вертикальных профилей температуры атмосферы, полученных с помощью сканирующего сверхвысокочастотного (CB4) лимбового зонда MLS (Microwave Limb Sounder) со спутника EOS Aura (http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/Aura/data-holdings/MLS). В периоды усиления стратосферной волновой активности, когда наблюдалось заметное повышение ВГВ-активности на высотах F2-слоя ионосферы, отмечались сильные вариации спутниковой температуры на уровнях стратосферы и мезосферы (показано овалами на нижних графиках *рис. 4*). Однако, следует особо подчеркнуть, что СВЧ-зонд MLS Aura дает два измерения за сутки на

восходящей и нисходящей орбитах пролета спутника над заданным географическим регионом, поэтому мы не можем говорить по этим данным о временных вариациях температуры менее 12 часов.

Установлено, что с амплитудой и временем проявления ионосферных волновых возмущений хорошо коррелируют скоростные и энергетические характеристики СТ (например, параметр  $\Omega$ , поток Элиассена-Пальма, горизонтальные скорости движения газа на уровне 10 мб), рассчитывавшиеся отдельно для всего северного полушария, для северовосточной четверти (СВ квадранта) земного шара, для области 10\*10 град. над Иркутском и для диапазона широт 40-90° с.ш. для 102,5° в.д. Наилучшее согласие выявлено для временных рядов коэффициента вариации максимума электронной концентрации в F2-слое ионосферы в дневное время и максимальной скоростью зонального движения газа на высоте 10 мб в интервале широт 40-90° с.ш. для 102,5° в.д. (*рис. 5*). Коэффициент корреляции равнялся 0,8 при использовании скользящих средних за 5 дней.



*Рис. 5. Временные вариации VrNmF2 в дневное время и максимальной зональной скорости движения газа на высоте 10 мб в интервале широт 40-90°с.ш. для долготы 102,5° в.д.* 

#### Заключение

В результате проведенного исследования получены следующие результаты.

Изучен ход средних и максимальных значений скорости воздушных потоков на высотах тропосферы и стратосферы по данным реанализа NCEP/NCAR, рассчитаны параметры волновой возмущенности на высотах тропосферы и стратосферы для разных пространственных областей северного полушария.

Выявлены периоды крупномасштабных волновых движений в стратосфере на высоте 10 мб в холодное время года в периоды с ноября по февраль 2008-2010 гг. Эти волны ассоциированы со стратосферными струйными течениями, наблюдавшимися на периферии зимнего циркумполярного циклона и, в основном, локализованными на широтах 50-80°с.ш. В периоды стратосферной волновой активности наблюдалось заметное повышение ВГВ-активности на высотах F2-слоя ионосферы.

Установлено, что изменения коэффициента вариации максимума электронной концентрации в F2-слое ионосферы в дневное время хорошо согласуются с вариациями максимальной скорости движения газа на высоте 10 мб на долготе 102,5° в.д. в интервале широт 40-90° с.ш. с коэффициентом корреляции r = 0,8, что может объясняться генерацией при достижении определенных критических скоростей ветра струйным течением волновых возмущений как в стратосфере, так и в ионосфере.

Данные спутниковых измерений температуры подтвердили наличие существенных вариаций параметров стратосферы и верхней мезосферы в периоды усиления волновой возмущенности F2-слоя ионосферы.

Работа выполнена в рамках Проекта № ОНЗ-8.2 "Исследование отклика ионосферы на экстремальные явления в нейтральной атмосфере в азиатском долготном секторе", гранта № НШ-2942.2014.5 Президента РФ государственной поддержки ведущих научных школ РФ, а также при поддержке грантов РФФИ № 12-05-00865-а и № 14-05-00259-а.

# Литература

- 1. *Куницын В.Е., Сураев С.Н., Ахмедов Р.Р.* Моделирование распространения акустико-гравитационных волн в атмосфере для различных поверхностных источников // Вестник Моск. ун-та. Серия 3. Физика. Астрономия. 2007. № 2. С. 59-63.
- 2. *Онищенко О.Г.* Отклик ионосферы на мощные тропические вихри // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 3. С. 107-109.
- 3. Черниговская М.А., Куркин В.И., Орлов И.И., Ойнац А.В., Поддельский И.Н. Статистический анализ эффектов тропических циклонов в вариациях параметров ионосферы в азиатском регионе России по данным наклонного радиозондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 5. С. 208-217.
- 4. Черниговская М.А., Сутырина Е.Н., Ратовский К.Г. Морфологический анализ ионосферной возмущенности над Иркутском в периоды сильных метеорологических возмущений по данным вертикального радиозондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 1. С. 142-152.
- 5. *Bertin F.; Testud J.; Kersley L.; Rees P.R.* The meteorological jet stream as a source of medium scale gravity waves in the thermosphere An experimental study // J. Atmos. Terr. Phys. 1978. Vol. 40. P. 1161-1183.
- 6. Bishop R.L., Aponte N., Earle G.D., Sulzer M., Larsen M.F., Peng G.S. Arecibo observations of ionospheric perturbations associated with the passage of Tropical Storm Odette // J. Geophys. Res. 2006. Vol. 111. No. A11. P. A11320. doi:10.1029/2006JA011668.
- 7. Buonsanto M.J. Ionospheric storms a review // Space Science Rev. 1999. Vol. 88. P. 563-601.
- 8. *Fritts D.C., Alexander M.J.* Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere // Rev. Geophys. 2003. Vol. 41. No. 1. P. 1003-1066. doi: 10.1029/2001RG000106.
- 9. *Hocke K., Schlegel K.* A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982-1995 // Ann. Geophys. 1996. Vol. 14. P. 917-940.
- 10. *Kazimirovsky E.S., Herraiz M., De la Morena B.A.* Effects on the ionosphere due to phenomena occurring below it // Survey in Geophys. 2003. Vol. 24. No. 1. P. 139-184.
- 11. Labitzke K., van Loon H. The Stratosphere: Phenomena, History, and Relevance. Berlin: Springer, 1999. 179 p.
- 12. *Lastovicka J.* Forcing of the ionosphere by waves from below // J. Atmos. and Solar-Terr. Phys. 2006. Vol. 68. P. 479-497.
- 13. *Martinis C.R., Manzano J.R.* The influence of active meteorological systems on the ionospheric F-region // Annals of Geophysics 1999. Vol. 42. No. 1. P. 1-7.

- 14. *Mao T, Wang J.S., Yang G.L., Yu T., Ping J., Suo Y.* Effects of typhoon Matsa on ionospheric TEC // Chinese Sci. Bull. 2010. Vol. 55. No. 8. P. 712-717.
- 15. *Plougonven R., Snyder C.* Inertia-gravity waves spontaneously generated by jets and fronts. Part I: Different baroclinic life cycles // J. Atmos. Sci. 2007. Vol. 64. P. 2502-2520.
- 16. *Polyakova A.S., Perevalova N.P.* Investigation into impact of tropical cyclones on the ionosphere using GPS sounding and NCEP/NCAR Reanalysis data // Adv. in Space Res. 2011. Vol. 48. P. 1196-1210.
- 17. *Prasad S.S., Schneck L.J., Davies K.* Ionospheric disturbances by severe tropospheric weather storms // J. Atmos. Terr. Phys. 1975. Vol. 37. P. 1357-1363.
- Rishbeth H. F-regon links with the low atmosphere? // J. Atmos. and Sola-Terr. Phys. 2006. Vol. 68. P. 469-478.
- 19. *Šauli P., Boška J.* Tropospheric events and possible related gravity wave activity effects on the ionosphere // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2001. Vol. 63. P. 945-950.
- 20. Šindelářová T., Burešová D., Chum J., Hruška F. Doppler observations of infrasonic waves of meteorological origin at ionospheric heights // Adv. Space Res. 2009. Vol. 43. P. 1644-1651.
- 21. *Thomas L., Worthington R.M., McDonald A.J.* Inertia-gravity waves in the troposphere and lower stratosphere associated with a jet stream exit region // Ann. Geophys. 1999. Vol. 17. P. 115-121.
- 22. *Vadas S.L.* Horizontal and vertical propagation of gravity waves in thermosphere from lower atmospheric and thermospheric sources // J. Geophys. Res. 2007. Vol. 112. P. A06305.
- 23. *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.

# Meteorological effects of ionospheric disturbances over Irkutsk according to vertical radio sounding data

## M.A. Chernigovskaya, E.N. Sutyrina, K.G. Ratovsky

# Institute of Solar-Terrestrial Physics, Siberian Branch RAS, Irkutsk 664033, Russia E-mail: cher@iszf.irk.ru

This paper deals with ionospheric disturbances caused by the processes in bottom layers of the lower and middle atmosphere (i.e., the so-called meteorological effects in the ionosphere). The ionospheric data were obtained from continuous measurements made at the vertical sounding ionosonde DPS-4 in Irkutsk in 2008-2010. The ionospheric disturbances referred to deviations of the maximum electron density NmF2 from the median values. We also used data from the NCEP/NCAR reanalysis project and the MLS Aura data on atmospheric temperature at heights of the stratosphere and upper mesosphere, obtained in 2008-2010. The analysis allowed us to reveal periods of large-scale wave motions in the stratosphere at a height of 10 mbar, mainly during cold seasons. These wave motions were associated with the jet streams at heights of the stratosphere, localized mainly at latitudes of 50-80 N. The waves propagated westward, generally in latitudinal direction; however, sometimes meridional direction of the wave propagation was observed. The large-scale wave motions in the stratosphere time of ionosphere were compared with ionospheric disturbances over Irkutsk. The amplitude and occurrence time of ionospheric disturbances correlated well with velocity and energy characteristics of stratospheric jet streams.

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

#### References

- Kunitsyn V.E., Suraev S.N., Akhmedov R.R., Modelirovanie rasprostraneniya akustiko-gravitatsionnykh voln v atmosfere dlya razlichnykh poverkhnostnykh istochnikov (Modeling of acoustic-gravity waves in the atmosphere for various surface sources), *Vestnik Mosk. un-ta. Seriya 3. Fizika. Astronomiya*, 2007, No. 2, pp. 59-63.
- Onishchenko O.G., Otklik ionosfery na moshchnye tropicheskie vikhri (The response of the ionosphere to powerful tropical vortices), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2010, Vol. 7, No. 3, pp. 107-109.
- Chernigovskaya M.A., Kurkin V.I., Orlov I.I., Oinats A.V., Poddelsky I.N., Statisticheskii analiz effektov tropicheskikh tsiklonov v variatsiyakh parametrov ionosfery v aziatskom regione Rossii po dannym naklonnogo radiozondirovaniya (Statistical analysis of effects of tropical cyclones on variations of ionospheric parameters in the Asian region of Russia according to oblique radio-sounding data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 5, pp. 208-217.

- 4. Chernigovskaya M.A., Sutyrina E.N., Ratovsky K.G., Morfologicheskii analiz ionosfernoi vozmushchennosti nad Irkutskom v periody sil'nykh meteorologicheskikh vozmushchenii po dannym vertikal'nogo radiozondirovaniya (Morphological analysis of ionospheric disturbances over Irkutsk during the most powerful meteorological disturbances, according to vertical radio sounding data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 1, pp. 142-152.
- 5. Bertin F.; Testud J.; Kersley L.; Rees P.R., The meteorological jet stream as a source of medium scale gravity waves in the thermosphere An experimental study, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1978, Vol. 40, pp. 1161-1183.
- 6. Bishop R.L., Aponte N., Earle G.D., Sulzer M., Larsen M.F., Peng G.S., Arecibo observations of ionospheric perturbations associated with the passage of Tropical Storm Odette, *J. Geophys. Res.*, 2006, Vol. 111, No. A1, p. A11320. doi:10.1029/2006JA011668.
- 7. Buonsanto M.J., Ionospheric storms a review, Space Science Rev., 1999, Vol. 88, pp. 563-601.
- 8. Fritts D.C., Alexander M.J., Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere, *Rev. Geophys.*, 2003, Vol. 41, No. 1, pp. 1003-1066, doi: 10.1029/2001RG000106.
- 9. Hocke K., Schlegel K., A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982-1995, *Ann. Geophys.*, 1996, Vol. 14, pp. 917-940.
- 10. Kazimirovsky E.S., Herraiz M., De la Morena B.A., Effects on the ionosphere due to phenomena occurring below it, *Survey in Geophys.*, 2003, Vol. 24, No. 1, pp. 139-184.
- 11. Labitzke K., van Loon H., *The Stratosphere: Phenomena, History, and Relevance*. Berlin: Springer, 1999, 179 p.
- 12. Lastovicka J., Forcing of the ionosphere by waves from below, *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.*, 2006, Vol. 68, pp. 479-497.
- 13. Martinis C.R., Manzano J.R., The influence of active meteorological systems on the ionospheric F-region, *Annals of Geophysics*, 1999, Vol. 42, No. 1, pp. 1-7.
- 14. Mao T, Wang J.S., Yang G.L., Yu T., Ping J., Suo Y., Effects of typhoon Matsa on ionospheric TEC, *Chinese Sci. Bull.*, 2010, Vol. 55, No. 8, pp. 712-717.
- 15. Plougonven R., Snyder C., Inertia-gravity waves spontaneously generated by jets and fronts. Part I: Different baroclinic life cycles, *J. Atmos. Sci.*, 2007, Vol. 64, pp. 2502-2520.
- 16. Polyakova A.S., Perevalova N.P., Investigation into impact of tropical cyclones on the ionosphere using GPS sounding and NCEP/NCAR Reanalysis data, *Adv. in Space Res.*, 2011, Vol. 48, pp. 1196-1210.
- 17. Prasad S.S., Schneck L.J., Davies K., Ionospheric disturbances by severe tropospheric weather storms, J. Atmos. Terr. Phys., 1975, Vol. 37, pp. 1357-1363.
- 18. Rishbeth H., F-regon links with the low atmosphere?, J. Atmos. and Sola-Terr. Phys., 2006, Vol. 68, pp. 469-478.
- 19. Šauli P., Boška J., Tropospheric events and possible related gravity wave activity effects on the ionosphere, *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 2001, Vol. 63, pp. 945-950.
- 20. Šindelářová T., Burešová D., Chum J., Hruška F., Doppler observations of infrasonic waves of meteorological origin at ionospheric heights, *Adv. Space Res.*, 2009, Vol. 43, pp. 1644-1651.
- 21. Thomas L., Worthington R.M., McDonald A.J., Inertia-gravity waves in the troposphere and lower stratosphere associated with a jet stream exit region, *Ann. Geophys.*, 1999, Vol. 17, pp. 115-121.
- 22. Vadas S.L., Horizontal and vertical propagation of gravity waves in thermosphere from lower atmospheric and thermospheric sources, *J. Geophys. Res.*, 2007, Vol. 112, pp. A06305.
- 23. 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.