

## **Морфологический анализ ионосферной возмущенности над Иркутском в периоды сильных метеорологических возмущений по данным вертикального радиозондирования**

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

*Институт солнечно-земной физики СО РАН  
664033 Иркутск, а/я 291  
E-mail: cher@iszf.irk.ru*

В работе предпринята попытка выявить эффекты метеорологических возмущений в вариациях параметров ионосферы. Для исследования метеоэффектов были использованы данные архива реанализа NCEP/NCAR за 2009 г. В результате анализа выявлены периоды крупномасштабных волновых движений в стратосфере на высоте 10 мбар преимущественно в холодное время года, которые могут быть ассоциированы со струйными течениями на более низких высотных уровнях, в основном, локализованными на широтах 50–80° с. ш. Крупномасштабные волновые движения в стратосфере сопоставлены с ионосферными возмущениями над Иркутском. Ионосферные данные получены на основе непрерывных измерений на Иркутском ионозонде вертикального зондирования DPS-4. В качестве характеристики ионосферной возмущенности был выбран коэффициент вариаций максимума электронной концентрации, переставляющий собой нормированную дисперсию вариаций этой величины в дневное время.

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

### **Введение**

В работе выполнено исследование возмущений параметров ионосферы, вызванных процессами, происходящими в нижележащих слоях атмосферы (тропосфере, стратосфере, мезосфере), т.е. так называемых метеорологических эффектов. Ионосфера Земли является наиболее изменчивой частью земной атмосферы, подверженной воздействию как сверху – солнечное электромагнитное и корпускулярное излучение, магнитосферное воздействие, так и снизу – со стороны нижележащих слоев (тропические и внутропические циклоны, фронтальные системы, струйные течения, грозы, стратосферные потепления, солнечный терминатор, землетрясения, извержения вулканов и т.д.). Доминирующим фактором в термодинамическом режиме ионосферы является гелиогеомагнитная активность (Buonsanto, 1999; Петрукович и др., 2008). К настоящему времени накоплен ряд экспериментальных и теоретических данных, свидетельствующих о том, что мощные метеорологические возмущения 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 надежного экспериментального и теоретического подтверждения этим гипотезам не получено до сих пор.

Воздействию на процессы в ионосфере со стороны нижних слоев атмосферы до недавнего времени уделялось значительно меньше внимания по сравнению с интенсивными исследованиями механизмов влияния солнечных и геомагнитных факторов (воздействие сверху).

Морфологические особенности возмущений верхней атмосферы и ионосферы в спокойных гелиогеомагнитных условиях, установленные на основе анализа поведения крайне ограниченного набора параметров атмосферы и ионосферы, имеют сложный пространственно-временной характер и требуют дополнительного изучения. Тем не менее, установлено, что на средних широтах в спокойных гелиогеомагнитных условиях, когда воздействие солнечных и магнитосферных эффектов на характеристики ионосферы минимальны, параметрынейтральной атмосферы и ионосферы могут существенно меняться ото дня ко дню (до 15–20% и более), вызывая вариации характеристик ионосферного радиоканала.

Еще во множестве ранних исследований показано существование тесных корреляционных связей между волновыми возмущениями в атмосфере и ионосфере и мощными погодными явлениями, такими как грозы, тайфуны, торнадо, тропические циклоны, холодные фронты и т.п. В работе (Baker, Davis, 1969) отмечались волнообразные ионосферные возмущения с характерными периодами 2–5 минут, тесно связанные с мощными штормами в тропосфере и интерпретируемые как проявление АВ, генерируемых штормами. В работах (Davies, Jones, 1971, 1973; Prasad et al., 1975) авторы описывали квазисинусоидальные колебания, зарегистрированные во время сильных гроз. Авторы работ (Shen, 1982; Okuzawa et al., 1986; Bishop et al., 2006; Перевалова, Полех, 2009; Mao et al., 2010; Polyakova, Perevalova, 2011; Lin, 2012; 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 (F-spread) (Inan et al., 1991; Taranenko et al., 1993; Huang, Kelly, 1996; Isaev et al., 2002). В ряде обзорных работ (Kazimirovsky, 2002; Kazimirovsky et al., 2003; Lastovicka, 2006; Rishbeth, 2006; Immel et al., 2009; Vincent, 2009) показана важность исследований влияния различного рода волновых движений, возникающих в 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.

Источниками генерации ВГВ могут быть и струйные течения (СТ) (Bertin et al., 1978; Thomas et al., 1999; Plougonven et al., 2003; Fritts, Alexander, 2003; Buss et al., 2004; Zulicke, Peters, 2007; Plougonven, Snyder, 2007). По определению Всемирной метеорологической организации «струйное течение – это сильный узкий поток с почти горизонтальной осью в верхней тропосфере (9–12 км) или нижней стратосфере (25–30 км), характеризующийся большими вертикальными и горизонтальными сдвигами ветра и одним или более максимумами скорости». Длина струйного течения – тысячи км, ширина – сотни км, толщина – несколько км. Максимальные скорости ветра наблюдаются на оси струйного течения и могут колебаться от 108 км/ч до 250–350 км/ч. В струйных течениях сконцентрирована максимальная кинетическая энергия атмосферы. Струйные течения возникают в связи с фронтальными зонами между воздушными массами тропосферы.

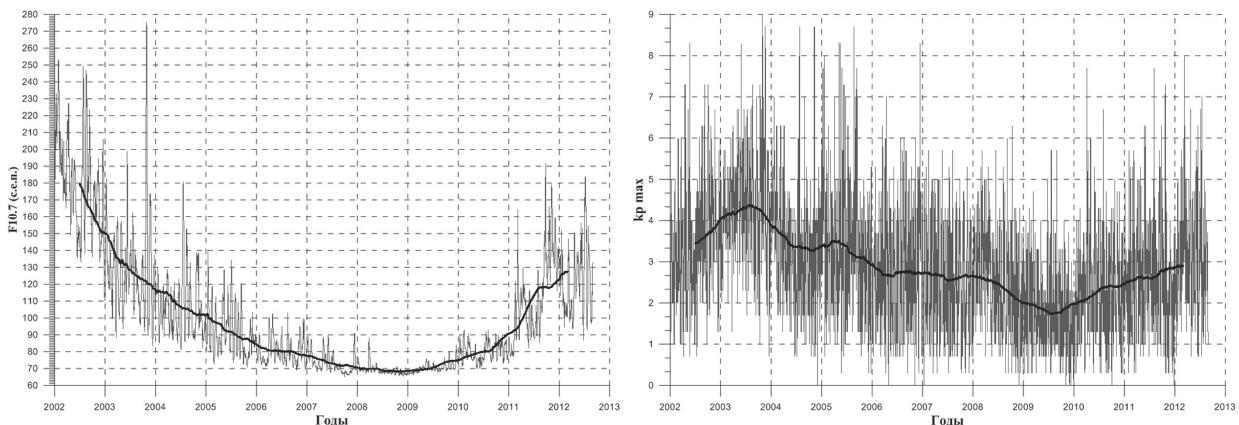
Целью работы было выявление эффектов СТ в вариациях параметров ионосферы в условиях минимума солнечной активности в 2009 г. над регионом г. Иркутск.

## Используемые данные

Для анализа использовались следующие данные:

- Четырехсрокные данные архива реанализа NCEP/NCAR за 2009 г., содержащие массивы значений зональной и меридиональной компонент вектора скорости ветра, а также производной давления по времени для всего северного полушария на высотах 10, 100, 200 и 850 мбар. 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, полученные на основе непрерывных измерений на Иркутском ионозонде вертикального зондирования DPS-4 ( $52^{\circ}$  с. ш.,  $104^{\circ}$  в. д.).

Как подчеркивалось выше, доминирующим фактором в термодинамическом режиме ионосферы является гелиогеомагнитная активность. Поэтому для эффективного разделения возмущений при анализе учитывалась сопутствующая гелиогеомагнитная возмущенность (поток солнечного радиоизлучения  $F_{10,7}$  на длине 10,7 см в ед.  $10^{-22}$  Вт/(Гц·м<sup>2</sup>) и геомагнитные индексы  $K_p$ ). Особенностью рассматриваемого 2009 г. являлось то, что он характеризовался минимумом солнечной активности с низкой интенсивностью активных событий на Солнце и сопутствующих им геомагнитных возмущений (*рис. 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  $\Omega$ , характеризующий изменения барического поля на высоте 10 мб на текущий срок наблюдения

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

вычисляющийся как разность максимального и минимального значения  $dp/dt$  в области  $10 \times 10$  град. в окружении г. Иркутска. 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:

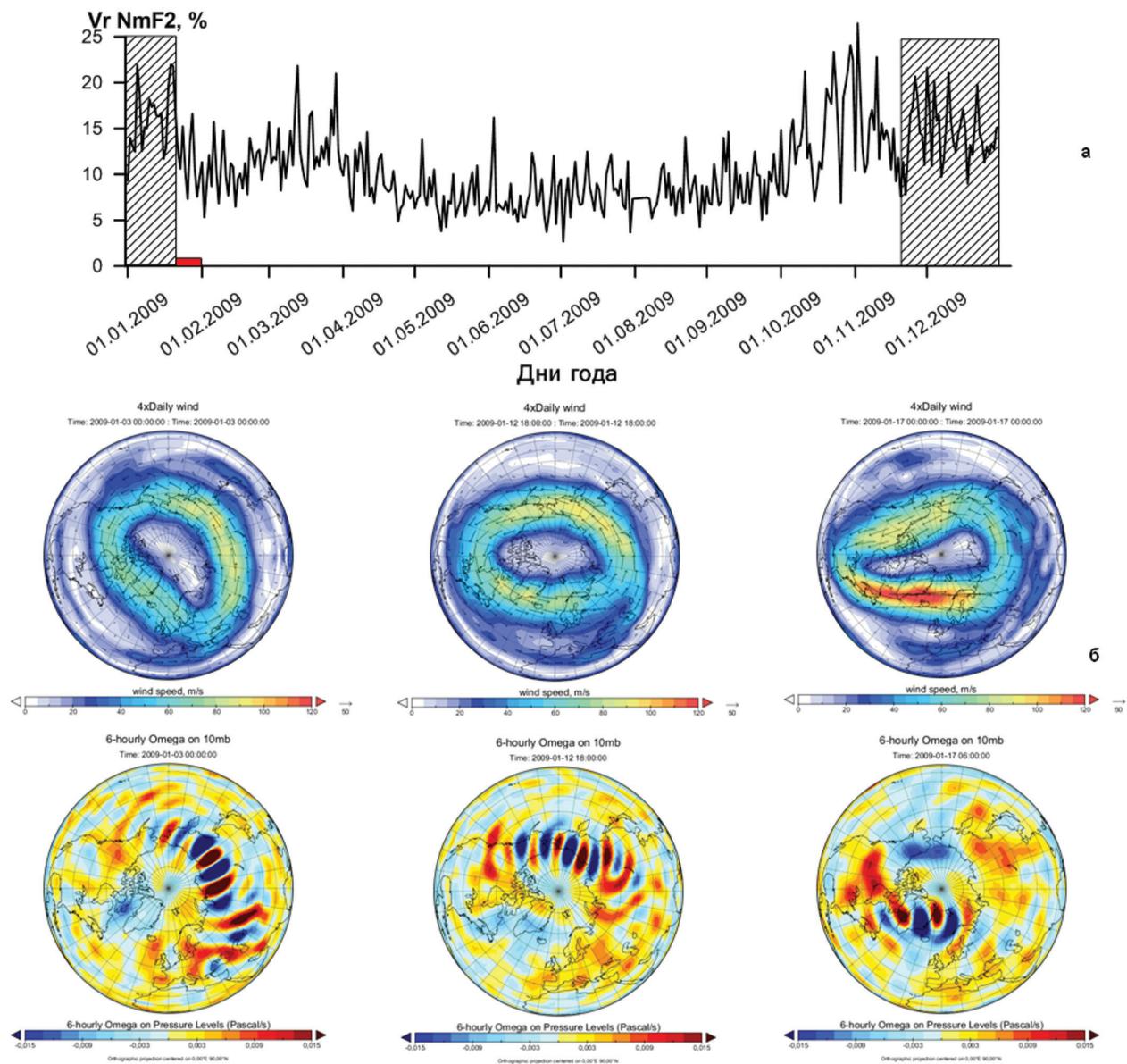
$$VrNmF2 = 100\% \cdot \sqrt{\langle (NmF2 - \langle NmF2 \rangle)^2 \rangle / \langle NmF2 \rangle}, \quad (2)$$

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  $T < 6$  часов. Таким образом, индекс  $VrNmF2$  отражает ВГВ-активность на высотах F2-слоя ионосферы.

## Результаты анализа данных

По данным реанализа NCEP/NCAR, были выявлены временные интервалы крупномасштабных волновых движений с периодами не менее 6 часов в стратосфере на высоте 10 мбар в холодное время года в периоды 1–21 января и 19 ноября – 31 декабря 2009 г. Преимущественно волны распространялись в широтном направлении на запад, но в определенные периоды имело место и меридиональное направление распространения волн. В среднем длина волн составляла 1,5 тыс. км. Эти волны ассоциированы со стратосферными СТ, наблюдавшимися на периферии зимнего циркумполярного циклона и, в основном, локализованными на широтах 50–80° с. ш. (рис. 2.6). На изобарической поверхности 10 мбар (порядка 30 км) на январской карте средняя скорость ветра превышала 120 км/час.

Зимой развитие стратосферной области низкого давления над центральной Арктикой и стратосферных областей высокого давления над умеренными и субтропическими широтами создает большие контрасты температуры между полярной и тропической зонами в стратосфере. В зоне этих контрастов температуры возникают сильные ветры западного направления. Наибольшее усиление струи происходит в декабре–январе (Погосян, 1972). Наибольшие горизонтальные градиенты температуры создаются между 50 и 80° с. ш. В декабре, когда температура слоя 20–25 км в полярной области опускается до  $-70$ ,  $-80^{\circ}\text{C}$ , в умеренных широтах наблюдаются температуры близкие к  $-50$ ,  $-55^{\circ}\text{C}$ . В результате формируется преимущественно западное стратосферное СТ со скоростями ветра, превышающими 100 м/с на высотах 20–25 км и 150 м/с на высоте 40 км. Стратосферное СТ образуется на границе полярной ночи, где наибольший температурный градиент образуется как результат различий радиационного охлаждения внутри и снаружи этой зоны в течение зимы. Оно опоясывает Арктику, располагаясь широкой полосой в той области, где возникают наибольшие контрасты температур. Генетически связанное с периферией зимнего циркумполярного циклона СТ меняет свое положение и интенсивность в связи с режимом циклона. Оно смещается далеко в умеренные широты в вершинах планетарных стратосферных ложбин. В стратосфере центральной Арктики наблюдаются более слабые ветры, чем в периферийных районах, где имеют место наибольшие температурные контрасты между стратосферой умеренных широт, освещаемой Солнцем, и арктической стратосферой, находящейся в земной тени.



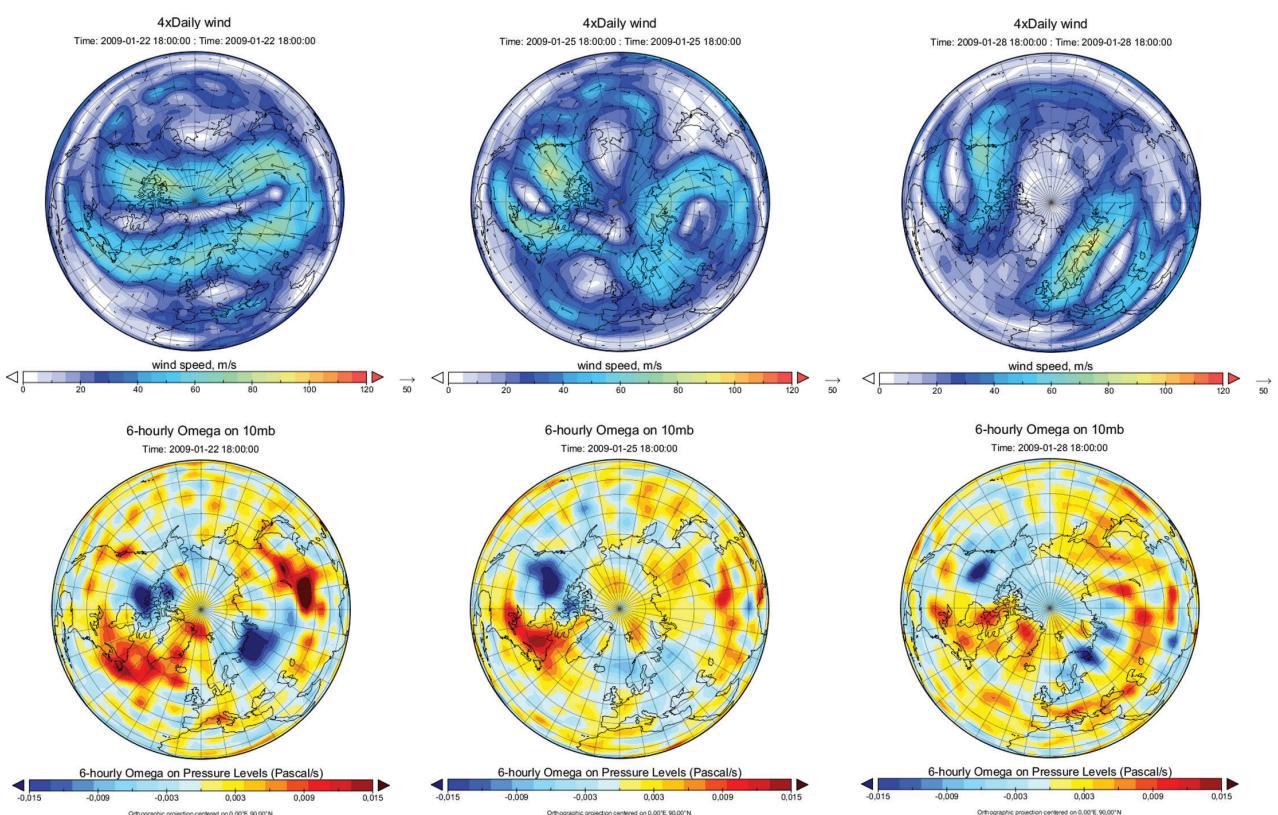
*Рис. 2. Временные вариации коэффициента вариации  $VrNmF2$  (а); положения стратосферного струйного течения и ассоциированные с ним крупномасштабные волновые движения в стратосфере на изобарической поверхности 10 мб в северном полушарии для отдельных дней января – 3, 12, 17 января 2009 г. (б)*

На рис. 2а представлены вариации коэффициента  $VrNmF2$ . Заштрихованные прямоугольники соответствуют периодам стратосферной волновой активности; ассоциированной со стратосферным СТ. После 20 января над регионом Иркутска начало развиваться внезапное стратосферное потепление (ВСП) типа «major» (красный прямоугольник на временной оси), температурный максимум  $T_{max} = 307$  °К (34 °C) которого наблюдался 22 января 2009 г. на высоте ~39 км. Из рисунка видно, что действительно в периоды стратосферной волновой активности наблюдалось заметное повышение ВГВ-активности на высотах  $F2$ -слоя ионосферы: средние значения  $VrNmF2$  для периодов 1–21 января 2009 г. и 19 ноября – 31 декабря 2009 г. (16,2% и 14,3% соответственно) превышают третью квартиль распределения  $VrNmF2$  по всему году (13,5%). Однако, рис. 2,а также показывает, что в 2009 г. существует еще два периода повышения ВГВ-активности на высотах  $F2$ -слоя:

12–29 марта (71–88 дни) и 20 октября – 10 ноября (293–314 дни), средние значения  $VrNmF2$  составляло 13,9% и 17,6%, соответственно.

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

В случае развития ВСП в конце января 2009 г. западное СТ ослабело, циркумполярный вихрь был разрушен к 25 января и разделен на четыре вихря (два – циклонического типа, два – антициклонического типа), зональная циркуляция сменила направление на восточное. ВГВ активность в стратосфере, ассоциированная со СТ, прекратилась (рис. 3).



*Рис. 3. Пространственное распределение скоростей горизонтального ветра и параметра  $\Omega$  на изобарической поверхности 10 мб в северном полушарии для отдельных дней января – 22, 25, 28 января 2009 г.*

Была предпринята попытка сравнить непосредственно временной ход коэффициента вариации максимума электронной концентрации  $VrNmF2$  с параметром  $\Omega$  (1) для региона г. Иркутск (рис. 4). Видно, что в начале января 2009 г. вариации этих двух па-

метров хорошо согласуются, в конце года тоже есть частичное согласие. Но усиления ВГВ-активности на высотах  $F2$ -слоя 12–29 марта и 20 октября – 10 ноября 2009 г. никак не объясняются поведение параметра  $\Omega$ .

Причиной повышения ВГВ-активности на высотах ионосферы может являться геомагнитная активность. На рис. 5 представлено наложение вариаций индекса  $VrNmF2$  и максимального значения  $K_p$ -индекса для каждого суток. Из рисунка видно, что корреляция между индексами  $VrNmF2$  и  $K_p$  наблюдается только фрагментарно, таким образом, повышения ВГВ-активности в марте и октябре 2009 г. не может быть связано с повышенной геомагнитной активностью.

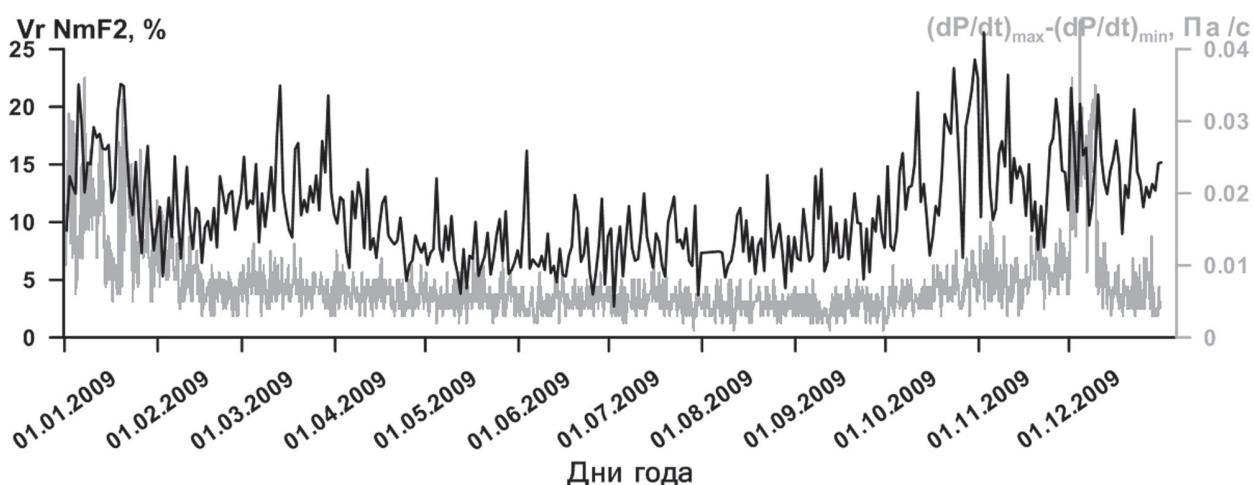


Рис. 4. Временные изменения коэффициента вариации  $VrNmF2$  и параметра  $\Omega$  на изобарической поверхности 10 мб для региона Иркутска в 2009 г.

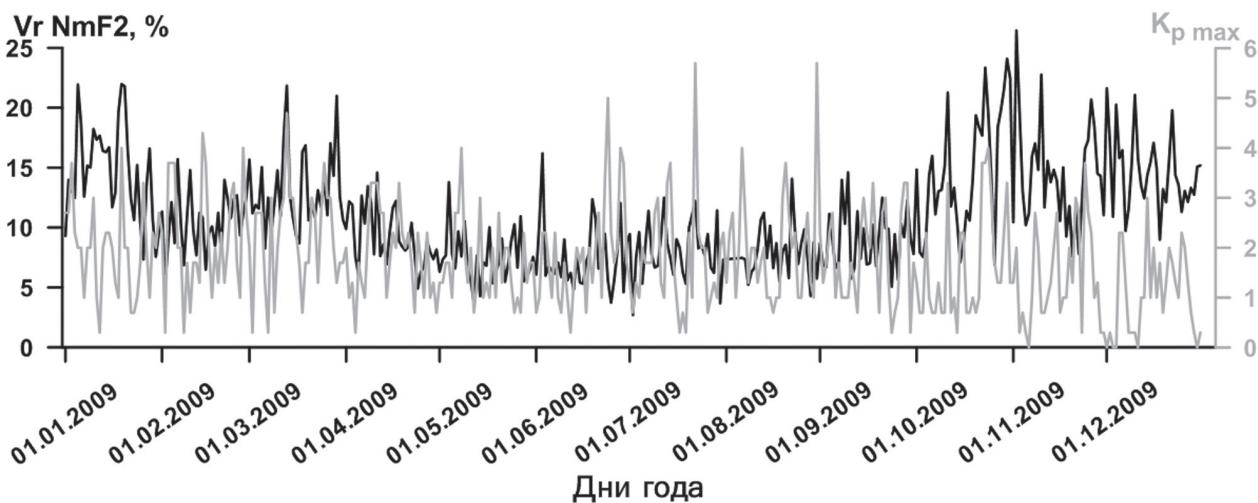


Рис. 5. Временные изменения коэффициента вариации  $VrNmF2$  и максимального за сутки геомагнитного индекса  $K_p$  в 2009 г.

Возмущения в ионосфере (вариации электронной концентрации в F-области) могут быть также обусловлены вариациями температуры в нижележащей атмосфере (стратосфере, мезосфере). Мы проанализировали временные вариации температуры на высотах стратосферы ( $\sim 30$  и  $40$  км) и мезосферы ( $\sim 80$  и  $92$  км) по данным спутниковых

измерений вертикальных профилей температуры атмосферы, полученных с помощью сканирующего сверхвысокочастотного (СВЧ) лимбового зонда MLS (Microwave Limb Sounder), установленного на борту космического аппарата EOS Aura (<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/Aura/data-holdings/MLS>). Выявлены существенные вариации температуры, особенно на высотах мезосферы, в периоды отмеченных выше повышений волновой активности  $VrNmF2$  в марте и октябре 2009 г. Таким образом, можно косвенно предположить, что наблюдавшиеся волновые вариации на высотах F2-области ионосферы могли быть вызваны вариациями температуры в нижележащих слоях атмосферы. Но 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.

## Заключение

В результате проведенного исследования получены следующие результаты:

- По данным реанализа NCEP/NCAR выявлены периоды крупномасштабных волновых движений в стратосфере на высоте 10 мбар в холодное время года в периоды 1–21 января и 19 ноября – 31 декабря 2009 г. 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.
- Данные спутниковых измерений температуры нейтральной атмосферы подтвердили наличие вариаций параметров стратосферы, мезосферы и нижней термосферы 10–30 марта 2009 г. и 10 октября – 10 ноября 2009 г., когда отмечались 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», а также при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ № 12-05-00865\_а и № 11-05-00892-а) и Министерства образования и науки РФ (ГК № 14.518.11.7065).

## Литература

1. Куницын В.Е., Сураев С.Н., Ахмедов Р.Р. Моделирование распространения акусто-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. Перевалова Н.П., Полех Н.М. Исследование отклика верхней атмосферы на циклоны по данным ионозондов в Восточно-Сибирском и Дальневосточном регионах // Оптика атмосферы и океана. 2009. Т. 22. № 09. С. 882–889.
4. Петрукович А.А. (под ред.) Солнечно-земные связи и космическая погода // Плазменная гелиоаэрофизика. Гл. 8. М.: Физматлит. 2008. Т. 1. С. 175–257.
5. Черниговская М.А., Куркин В.И., Орлов И.И. и др. 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.
6. Baker D.M., Davis K. F2-region acoustic waves from severe weather // J. Atmos. Terr. Phys. 1969. Vol. 31. P. 1345–1352.
7. 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.
8. Bishop R.L., Aponte N., Earle G.D. et al. 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.
9. Buonsanto M.J. Ionospheric storms – a review // Space Science Reviews. 1999. V. 88. P. 563–601.
10. Buss S., Hertzog A., Hostettler C. et al. Analysis of a jet stream induced gravity wave associated with an observed stratospheric ice cloud over Greenland // Atmos. Chem. Phys. 2004. No. 4. P. 1183–1200.
11. Davies K., Jones J.E. Acoustic waves in the ionospheric F2-region produced by severe thunderstorms // J. Atmos. Terr. Phys. 1973. Vol. 35. P. 1737–1744.
12. Davies K., Jones J.E. Ionospheric disturbances in the F2 region associated with severe thunderstorms // J. Atmos. Sci. 1971. Vol. 28. P. 254–262.
13. 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.
14. Hocke K. and Schlegel K. A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982–1995 // Ann. Geophys. 1996. Vol. 14. P. 917–940.
15. Huang C.S., Kelly M.C. Nonlinear evolution of equatorial spread-F: 1. On the role of plasma instabilities and spatial resonance associated with gravity wave seeding // J. Geophys. Res. 1996. Vol. 101. P. 283–292.
16. Immel T.J., Mende S.B., Hagan M.E. et al. Evidence of Tropospheric Effects on the Ionosphere // Eos, 2009. Vol. 90. No. 9. P. 69–71.
17. Inan U.S., Bell T.F., Rodriguez J.V. Heating and ionization of the lower ionosphere by lightning // Geophys. Res. Lett. 1991. Vol. 18. P. 705–708.
18. Isaev N.V., Sorokin V.M., Chmyrev V.M., Serebryakova O.N. Electric fields in the ionosphere related to sea storms and typhoons // Geomagnetism and Aeronomy. 2002. Vol. 42. P. 638–643.
19. Kazimirovsky E.S. Coupling from below as a source of ionospheric variability: a review // Ann. Geophys. 2002. Vol. 45. No. 1. P. 11–29.

20. Kazimirovsky E.S., Herraiz M., De la Morena B.A. Effects on the ionosphere due to phenomena occurring below it // Survey in Geophysics. 2003. V. 24. No. 1. P. 139–184.
21. Lastovicka J. Forcing of the ionosphere by waves from below // J. Atmos. and Solar-Terr. Phys. 2006. V. 68. P. 479–497.
22. Lin J.W. Ionospheric total electron content anomalies due to Typhoon Nakri on 29 May 2008: A nonlinear principal component analysis // Computers & Geosciences. 2012. V. 46. P. 189–195.
23. Mao T, Wang J.S., Yang G.L. et al. Effects of typhoon Matsa on ionospheric TEC // Chinese Sci. Bull. 2010. Vol. 55. No. 8. P. 712–717. doi: 10.1007/s11434-009-0472-0.
24. Okuzawa T, Shibata T, Ichinose T. et al. Short-period disturbances in the ionosphere observed at the time of typhoons in September 1982 by a network of HF Doppler receivers // J. Geomag. Geoelectr. 1986. Vol. 38. P. 239–266.
25. Plougonven R., Teitelbaum H., Zeitlin V. Inertia gravity wave generation by the tropospheric midlatitude jet as given by the Fronts and Atlantic Storm-Track Experiment radio soundings // J. Geophys. Res. 2003. Vol. 108, No. D21, 4686, doi:10.1029/2003JD003535.
26. 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. DOI: 10.1175/JAS3953.1.
27. 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. V. 48, P. 1196–1210.
28. 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.
29. Rishbeth H. F-region links with the low atmosphere? // J. Atmos. and Sola-Terr. Phys. 2006. V. 68. P. 469–478.
30. Shen C.S. The correlations between the typhoon and the foF2 of ionosphere // Chin. J. Space Sci. 1982. Vol. 2, No. 4, P. 335–340.
31. Taranenko Y.N., Inan U.S., Bell T.F. The interaction with the lower ionosphere of electromagnetic pulses from lightning: excitation of optical emissions // Geophys. Res. Lett. 1993. Vol. 20. P. 2675–2678.
32. 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.
33. 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. doi: doi:10.1029/2006JA011845.
34. 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.
35. Zulicke C., Peters D.H.W. Impact of upper-level jet-generated inertia-gravity waves on surface wind and precipitation // Atmos. Chem. Phys. Discuss. 2007. No. 7, P. 15873–15909.

# **Morphological analysis of ionospheric disturbances over Irkutsk during the most powerful meteorological disturbances, according to vertical radio sounding data**

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

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS  
664033 Irkutsk, P/O Box 291  
E-mail: cher@iszf.irk.ru*

This paper attempts to determine effects of meteorological disturbances in variations of ionospheric parameters. Data from the NCEP/NCAR reanalysis project (2009) were used to study meteorological effects. The analysis allowed us to reveal periods of large-scale wave motions in the stratosphere at 10 mbar, mainly during cold seasons; they can be associated with the jet streams at lower heights, localised mainly at latitudes 50–80 N. The large-scale wave motions in the stratosphere were compared with ionospheric disturbances over Irkutsk. The ionospheric data were obtained from continuous measurements at the vertical sounding ionosonde DPS-4 in Irkutsk. The disturbances refer to deviations of the electron concentration maximum NmF2 from their median values.

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