## Метеорологические эффекты ионосферной возмущенности над регионом Восточной Сибири по данным вертикального радиозондирования

#### М.А. Черниговская, К.Г. Ратовский, Б.Г. Шпынев

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

Исследуются проявления в ионосфере среднемасштабных атмосферных волн в высокоскоростных струйных течениях стратосферы и мезосферы. Под возмущениями ионосферы понимаются отклонения максимума электронной концентрации *NmF2* от среднедневных значений. По данным архива реанализа ECMWF ERA-Interim выявлены среднемасштабные волновые движения в стратосфере на высоте 10 мб в осенне-зимний период (с ноября по февраль) в 2008–2010 гг., которые ассоциированы со стратосферными струйными течениями и могут быть источниками распространяющихся вверх гравитационных волн. Показано, что эти волновые возмущения передаются на высоты нижней мезосферы и выше и проявляются в виде перемещающихся атмосферных и ионосферных возмущений. Среднемасштабные волновые движения в стратосфере и мезосфере сопоставлены с ионосферными возмущениями над Иркутском и Норильском в 2008–2010 гг. Установлено, что динамические эффекты, связанные со стратосферным струйными течениями, проявляются на высотах ионосферы. Оценена зависимость этих эффектов от положения пункта наблюдения относительно зоны циркуляции струйного течения. Для обеих станций наибольшая изменчивость в ионосфере на высотах *F2*-слоя наблюдалась в зимнее время, а наименьшая – в летнее. Разница зима – лето более контрастна для Норильска.

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

#### Введение

Ионосфера является ионизованной областью земной атмосферы, подверженной воздействию как сверху - солнечное электромагнитное и корпускулярное излучение, магнитосферное воздействие, так и снизу - со стороны нижележащих слоев нижней и средней атмосферы. Определяющим фактором в термодинамическом режиме ионосферы является гелио-геомагнитная активность (Dudok, Watermann, 2010). В то же время большое количество экспериментальных и теоретических исследований свидетельствуют о том, что возмущения в 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; Yiğit, Medvedev, 2015). В ряде обзорных работ (Kazimirovsky et al., 2002; Lastovicka, 2006; Rishbeth, 2006; Vincent, 2009) показана важность исследований влияния различного рода волновых движений, возникающих в тропосфере и в стратосфере, на распределение параметров ионосферы. 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. Источниками ВГВ могут быть и струйные течения (СТ) на высотах нижней и средней атмосферы (Plougonven, Snyder, 2005; Manney et al., 2011).

Целью работы было выявление эффектов СТ в вариациях параметров ионосферы в условиях минимума солнечной активности в 2008–2010 гг. над регионом Восточной Сибири.

#### Используемые данные

В работе (Ratovsky et al., 2014а) приведены результаты статистического анализа ионосферных возмущений по данным иркутского ионозонда DPS-4 за 2003–2012 гг. для выявления суточно-сезонных вариаций в цикле солнечной активности. Анализировались отдельно полная возмущенность и интенсивность ВГВ разных периодов. Выявлено отсутствие вклада (или очень небольшой вклад) гелио-геомагнитной активности в высокочастотную составляющую ионосферной возмущенности и наличие четкой сезонной зависимости ВГВ-активности на высотах F2-слоя ионосферы (возмущенность зимой ~ в 2 раза выше, чем летом) для всех анализируемых лет. Сделано предположение о метеорологическом происхождении сезонной зависимости ВГВ-активности на высотах максимума электронной концентрации ионосферы.

Первые результаты исследований, направленных на выявление эффектов СТ в вариациях параметров ионосферы, по данным иркутского ионозонда для 2008–2010 гг. приведены в работе (Черниговская и др., 2014).

В настоящей работе для анализа использовались ионосферные данные о максимуме электронной концентрации NmF2, полученные на основе непрерывных измерений ионозондами вертикального зондирования (B3) DPS-4 на среднеширотной станции Иркутск (52° с.ш., 104° в.д.; 42°N GLAT, 177°E GLON) и высокоширотной станции Норильск (69° с.ш., 88° в.д.; 60°N GLAT, 166°E GLON); метеорологические данные архива реанализа ECMWF ERA-Interim, содержащие три компоненты вектора скорости ветра на фиксированных высотных уровнях; данные спутниковых измерений вертикальных профилей температуры средней атмосферы MLS Aura за 2008–2010 гг.

Принято разделять ионосферу Земли на три широтных зоны, которые имеют существенно разные свойства в зависимости от их геомагнитной широты (GLAT): низкоширотная (GLAT < 30°), среднеширотная ( $30^{\circ}$ < GLAT <  $60^{\circ}$ ) и высокоширотная зона (GLAT >  $60^{\circ}$ ) (Hunsucker and Hargreaves, 2003). Следуя этой классификации, Иркутск является типичной среднеширотной станцией, в то время как Норильск расположен вблизи границы между средне- и высокоширотной зонами, где ионосфера обладает свойствами обеих зон.

Как подчеркивалось выше, доминирующим фактором в термодинамическом режиме ионосферы является гелио-геомагнитная активность. Поэтому для разделения источников возмущений при анализе учитывалась гелио-геомагнитная обстановка. Рассматриваемый временной интервал 2008–2010 гг. характеризовался минимумом солнечной активности с низкой интенсивностью активных событий на Солнце и сопутствующих им геомагнитных возмущений. Это чрезвычайно благоприятствовало эффективности исследования ионосферных возмущений, связанных с влиянием внутренних атмосферных процессов.

Для описания пространственно-временных вариаций метеорологических параметров мы использовали данные реанализа ECMWF ERA-Interim Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (Dee et al., 2011). Этот реанализ предоставляет новые возможности для детализации распределения атмосферных динамических параметров на высотах стратосферы и нижней мезосферы. Пространственное разрешение массивов данных (температура, компоненты вектора скорости, геопотенциальной высоты поверхности) составляет ~80 км (0,75° по долготе и широте) на 60 вертикальных уровнях от поверхности Земли до 0,1 мб (http://www.ecmwf.int/en/research/climate-reanalysis/era-interim). Разработчики реанализа ECMWF ERA-Interim утверждают, что обеспечиваемое качество данных достаточно, чтобы воспроизвести реальное распределение атмосферных параметров до уровня давления 10 мб, при более высоких уровнях давления данные реанализа ECMWF ERA-Interim утвержать некоторые ошибки. Учитывая это, мы использовали данные реанализа ECMWF ERA-Interim до 1 мб (высота около 50 км).

В качестве характеристики ионосферной возмущенности использовался коэффициент вариаций максимума электронной концентрации *F2*-слоя ионосферы. Под возмущениями понимались отклонения максимума электронной концентрации *NmF2* от среднедневных значений. Коэффициент *VrNmF2* представляет собой нормированную дисперсию *NmF2* в дневное время:

$$VrNmF2 = 100\% \cdot \sqrt{\left\langle \left(NmF2 - \left\langle NmF2 \right\rangle\right)^2 \right\rangle} / \left\langle NmF2 \right\rangle, \tag{1}$$

где  $\langle \rangle$  означает усреднение по времени на интервале *T*, центрированном относительно местного полудня. Из (1) следует, что коэффициент *VrNmF2* пропорционален изменениям *NmF2* в диапазоне периодов *T*, не превышающих период усреднения. Если *T* составляет порядка нескольких часов, то изменения коэффициента *VrNmF2* описывают высокочастотную часть изменчивости концентрации в максимуме электронной концентрации *F2*-слоя (в диапазоне периодов от 0,5 до 6 ч), которая, в основном, вызвана ПИВ, связанными с распространением ВГВ. Таким образом, коэффициент *VrNmF2* отражает ВГВ-активность на высотах слоя F2 ионосферы.

В предыдущем исследовании (Черниговская и др., 2014) ионосферной возмущенности над Иркутском период усреднения T был выбран равным 6 часам (09-15 LT), что приблизительно соответствует длительности дня в зимнее время над Иркутском. Над Норильском ионосфера на высоте максимума электронной концентрации F2-слоя частично освещена днем в зимнее время в течение ~4 часов. Из этих соображений при исследовании высокочастотной части изменчивости NmF2 следует выбрать интервала усреднения меньшей длительности. Однако при прочих равных условиях сокращение интервала T ведет к уменьшению индекса VrNmF2. В итоге для Норильска индекс VrNmF2 был рассчитан как для 4-часового интервала T (10-14 LT), так и для 6-часового интервала T (09-15 LT) подобно иркутским данным.

### Результаты анализа данных

Также как и в работе (Черниговская и др., 2014) по данным реанализа NCEP/NCAR, имеющем более грубое пространственное разрешение, в настоящей работе в результате



Рис. 1. Примеры: а – стратосферных СТ (поля горизонтальных скоростей, м/с); б – среднемасштабных волновых движений, связанных со СТ (поля вертикальных скоростей, Па/с) на высоте 10 мб для отдельных дней зим 2009 г.; в – волновые движения (поля вертикальных скоростей, Па/с) на разных высотах стратосферы и нижней мезосфере

обработки данных реанализа ECMWF ERA-Interim выявлены среднемасштабные волновые движения в стратосфере на высоте 10 мб (~ 30 км) в зимние сезоны (ноябрь-февраль) всех анализируемых лет (рис. 16). Эти волны ассоциированы со СТ на высотах стратосферы (*puc. 1a*), которые 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, опоясывающее Арктику и образующее так называемый зимний циркумполярный вихрь (ЦПВ). На границе раздела между потоками воздуха с различными скоростями и/или направлениями (такими как, например, стратосферный ЦПВ с высокими скоростями и окружающая атмосфера с относительно слабыми ветрами) формировались зоны неустойчивости, в которых при достижении определенных критических скоростей ветра в струйном течении могли генерироваться атмосферные волны различных масштабов, в том числе волны Кельвина и ВГВ. Эти волны распространялись вверх из стратосферы в мезосферу (рис. 1в), приводили к изменению структуры и внутренней динамики нижней термосферы, и далее ионосферы, и проявлялись в виде перемещающихся атмосферных и ионосферных возмущений.



Рис. 2. Временные изменения коэффициента вариации VrNmF2, максимального за сутки геомагнитного индекса Кр, спутниковой температуры MLS Aura для дневных условий на высотах порядка 30 и 80 км над Иркутском (а) и Норильском (б) в 2008-2010 гг. Овалами показаны периоды усиления стратосферной волновой активности, серыми прямоугольниками – периоды ВСП

Следует отметить, что в зимние периоды 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» (отмечены серыми прямоугольниками на временных осях *рис. 2*). Известно, что с началом ВСП типа «major» нарушается обычная для зимы схема циркуляции, когда ЦПВ начинает мигрировать вблизи полюса, заметно ослабляется западный перенос, меняясь затем на восточный. ЦПВ разделяется на несколько более слабых вихрей или смещается от своего нормального расположения относительно полюса.

Установлено, что в периоды усиления стратосферной волновой активности, ассоциированной со стратосферными СТ, наблюдалось заметное повышение ВГВ-активности на высотах *F2*-слоя ионосферы по данным обеих станций ВЗ (показано овалами на верхних панелях *рис. 2*). Средние значения *VrNmF2* возрастали по сравнению с невозмущенными значениями в летние месяцы года более чем в 2 раза для Иркутска и более чем в 3 раза над Норильском. С увеличением уровня геомагнитной возмущенности (вторые сверху графики), 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 коэффициентами *VrNmF2* и *Кр* наблюдалась только фрагментарно.

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 верхней мезосферы (~80 км) по данным измерений вертикальных профилей температуры атмосферы с помощью сканирующего сверхвысокочастотного лимбового зонда MLS (Microwave Limb Sounder) со спутника EOS Aura, дающего два измерения за сутки на восходящей и нисходящей орбитах пролета спутника над заданным географическим



Рис. 3. Временные изменения VrNmF, усредненные скользящим средним по 27 дням, над Иркутском и Норильском в 2008-2010 гг.

регионом (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 температуры на уровнях стратосферы и мезосферы (показано овалами на нижних графиках *puc. 2*).

Затем мы сравнили ВГВ-активность на высотах *F2*-слоя ионосферы над среднеширотной станцией Иркутск и высокоширотной станцией Норильск для различных периодов усреднения для расчета коэффициентов *VrNmF2* по формуле (1) (*puc. 3*).

По рис. 3 можно выделить следующие закономерности:

1. для обеих станций независимо от интервала усреднения индекс *VrNmF2* максимален в зимнее время и минимален в летнее время. Для Норильска разница зима – лето независимо от интервала усреднения больше, чем для Иркутска;

2. сокращение интервала усреднения ведет к уменьшению индекса *VrNmF2*. Для 6-часового интервала усреднения индекс *VrNmF2* для Норильска больше, чем для 4-часового интервала. Это различие максимально в зимнее время и практически незаметно летом.

Возможные причины различия ВГВ-активности на высотах F2-слоя ионосферы над Норильском и Иркутском в зимние сезоны могли быть связаны с тем, что эти регионы были подвержены воздействию различных частей зимних стратосферных ЦПВ, которые меняли свою структуру каждую зиму. Над зоной ЦПВ генерировались среднемасштабные волновые движения, которые распространялись вверх до высот термосферы и ионосферы, изменяя баланс [O+]/[N2] и вызывая, как следствие, вариации ионосферных параметров.

Кроме того, при обсуждении особенностей реакции ионосферы на распространение снизу атмосферных возмущений метеорологического происхождения необходимо учитывать регулярные региональные особенности характеристик ионосферы по измерениям на ионозондах ВЗ над анализируемыми станциями (Ratovsky et al., 2014b). На *рис. 4* представлены эмпирические модели суточно-сезонных распределений NmF2 над Иркутском и Норильском по данным ВЗ за 2003–2008 гг. для условий низкой солнечной активности (Ratovsky, Oinats, 2011; Ratovsky et al., 2013).



Рис. 4. Эмпирические модели распределения максимума электронной концентрации NmF2 слоя F2 ионосферы над Иркутском (а) и Норильском (б)

Основные сходства регулярных распределений максимума электронной концентрации *NmF2* слоя *F2* ионосферы над среднеширотным Иркутском (*puc. 4a*) и высокоширотным Норильском (*puc. 4б*) состоят в том, что:

наибольшие дневные значения наблюдаются в октябре и марте (полугодовая гармоника);

- наибольшие ночные значения наблюдаются летом (годовая гармоника);

- зимний суточный ход характеризуется ночным пиком.

Основные различия регулярных распределений *NmF2* над Иркутском и Норильском состоят в:

– превышении значений *NmF2* в Иркутске по сравнению с Норильском для всех сезонов и времен суток;

– отсутствии зимней аномалии (превышение дневных зимних значений *NmF2* над дневными летними значениями) в Норильске;

– отсутствии вечернего летнего пика *NmF2* в Норильске.

Однако учет отмеченных выше региональных особенностей регулярных распределений максимума электронной концентрации *F2*-слоя ионосферы по данным B3 над анализируемыми станциями не влияет на сезонную зависимость высокочастотной части изменчивости максимума электронной концентрации *F2*-слоя.

### Заключение

В результате проведенного исследования получены следующие результаты.

На основе данных архива реанализа ECMWF ERA Interim выявлены периоды усиления среднемасштабных волновых движений в стратосфере на высоте 10 мб в периоды с ноября по февраль 2008–2010 гг. Эти волны ассоциируются нами со стратосферными струйными течениями, в основном локализованными на широтах 50–80° с.ш. Показано распространение волновых возмущений со стратосферных высот вверх в мезосферу с увеличением амплитуды волн.

В периоды стратосферной волновой активности отмечено существенное повышение ВГВ-активности на высотах F2-слоя ионосферы над регионом Восточной Сибири по данным станций ВЗ Иркутск и Норильск для всех анализируемых лет.

Для обеих станций наибольшая изменчивость в ионосфере на высотах F2-слоя наблюдалась в зимнее время, а наименьшая – в летнее (независимо от интервала усреднения). То есть ионосферная вариабельность полностью коррелирует с волновой активностью в стратосфере. Разница зима – лето более контрастна для Норильска.

Кроме общих особенностей существовали локальные различия в ВГВ-активности на высотах F2-слоя ионосферы над Норильском и Иркутском в весенне-осенний и летний сезоны, которые обусловлены случаями локального возрастания вариативности только над одной станцией. Эти различия, возможно, были связаны с особенностями в режимах сезонных перестроек термодинамического режима атмосферы и ионосферы над регионами Иркутска и Норильска, а также с различным влиянием метеорологической активности и/ или с местоположением источника метеорологической активности.

Работа выполнена в рамках гранта № НШ-2942.2014.5 Президента РФ государственной поддержки ведущих научных школ РФ, а также при поддержке грантов РФФИ № 15-05-05227-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. Черниговская М.А., Сутырина Е.Н., Ратовский К.Г. Метеорологические эффекты ионосферной возму-перпаеовская илл., сумырала Е.п., гатовская К.г. Кетеорологи всекие зфректы полосферной возму щенности над Иркутском по данным вертикального радиозондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 2. С. 264-274.
   Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M.A., Balsa-
- Dee D.P., Oppala S.M., Simmons A.J., Berrisjora P., Poll P., Kobayashi S., Anarde U., Balmaseda M.A., Balsa-mo 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., H'olm 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. Dudok De Wit T., Watermann J. Solar forcing of the terrestrial atmosphere // Comptes Rendus Geoscience. 2010.
- 4.
- Vol. 342. No. 4. pp. 259-272. *Hocke K., Schlegel K.* A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982-1995 // Ann. Geophys. 1996. Vol. 14. pp. 917-940. *Hunsucker R.D., Hargreaves J.K.* The High-Latitude Ionosphere and Its Effects on Radio Propagation. New York: 5.
- 6. Cambridge University Press, 2003. 617 p. *Kazimirovsky E.S.* Coupling from below as a source of ionospheric variability: a review // Ann. Geophys. 2002.
- 7. Vol. 45. No. 1. pp. 11–29.
- Lastovicka J. Forcing of the ionosphere by waves from below // J. Atmos. and Solar-Terr. Phys. 2006. Vol. 68. 8. pp. 479-497.
- 9. Manney G.L., Hegglin M.I., Daffer W.H., Santee M.L., Ray E.A., Pawson S., Schwartz M.J., Boone C.D., *Froidevaux L., Livesey N.J., Read W.G., Walker K.A.* Jet characterization in the upper troposphere/lower strato-sphere (UTLS): applications to climatology and transport studies // Atmos. Chem. Phys. 2011. Vol. 11. pp. 6115– 6137. doi:10.5194/acp-11-6115-2011.

- 10. Plougonven R., Snyder C. Inertia-gravity waves spontaneously generated by jets and fronts. Part I: Different baroclinic life cycles // J. Atmos. Sci. 2005. Vol. 64. pp. 2502-2520.
  11. Ratovsky K.G., Oinats A.V. Local empirical model of ionospheric plasma density derived from Digisonde measurements at Irkutsk // Earth, Planets and Space. 2011. Vol. 63. No. 4. pp. 351–357.
  12. Ratovsky K.G., Oinats A.V., Medvedev A.V. Regular features of the polar ionosphere characteristics from Digisonde measurements over Norilsk // Adv. Space Res. 2013. Vol. 51. No. 4. pp. 545–553.
  13. Ratovsky K.G., Medvedev A.V., Tolstikov M.V. Diurnal, seasonal and solar activity pattern of ionospheric variability from Irkutsk Digisonde data // Adv. Space Res. 2014a. http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2014
- variability from Irkutsk Digisonde data // Adv. Space Res. 2014a. http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2014. 08.001.

- 14. Ratovsky K.G., Shi J.K., Oinats A.V., Romanova E.B. Comparative study of high-latitude, mid-latitude and low-latitude ionosphere on basis of local empirical models // Adv. Space Res. 2014b. Vol. 54. No. 3. pp. 509-516.
- 15. Rishbeth H. F-regon links with the low atmosphere? // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2006. Vol. 68. pp. 469–478.
- 16. Vadas S.L. Horizontal and vertical propagation of gravity waves in thermosphere from lower atmospheric and thermospheric sources // J. Geophys. Res. 2007. Vol. 112, doi:10.1029/2006JA011845.
- 17. 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.
- Yiğit E., Medvedev A.S. Internal wave coupling processes in Earth's atmosphere // Adv. Space Res. 2015. Vol. 55. pp. 983–1003, http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2014.11.020.

# Meteorological effects of ionospheric disturbances over East Siberia region according to vertical radio sounding data

### M.A. Chernigovskaya, K.G. Ratovsky, B.G. Shpynev

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

We studied the seasonal variations of the high-frequency part of the F2 peak density variability caused by the traveling ionospheric disturbances associated with propagation of gravity waves (GWs) from the lower and middle atmosphere. The ionospheric disturbances referred to deviations of the F2 peak electron density  $N_{\mu}F2$  from the daily average values, i.e., deviation of the observed value from a regular behavior. The ionospheri<sup>m</sup> data were obtained from continuous measurements made at the vertical sounding ionosondes DPS-4 in Irkutsk and Norilsk in 2008–2010. We identified periods of middle-scale wave-like motions in the stratosphere between November and February 2008–2010 based on the ECMWF ERA-Interim reanalysis data. A noticeable increase in the GW activity was found at the heights of F2 layer during the periods of stratospheric wave activity over the study region. For both stations, the maximum variability in the ionosphere F2-layer was observed in winter; minimum – in summer. The summer–winter difference was more pronounced in case of Norilsk.

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

#### References

- 1. 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. Chernigovskaya M.A., Sutyrina E.N., Ratovsky K.G., Meteorologicheskie effekty ionosfernoi vozmushchennosti 2 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.
   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., H'olm 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., Thérest L. N. Vitert E. The Teb A. Interview proceeding and proceeding of the data constraints. C., Thépaut J.-N., Vitart F. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system, Q.J.R. Meteorol. Soc., 201, Vol. 137, pp. 553-597, doi:10.1002/qj.828.
- Dudok De Wit T., Watermann J. Solar forcing of the terrestrial atmosphere, *Comptes Rendus Geoscience*, 2010, Vol. 342, No. 4, pp. 259–272. 4.
- 5 Hocke K., Schlegel K. A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982-
- 1995, Ann. Geophys., 1996, Vol. 14, pp. 917–940. Hunsucker R.D., Hargreaves J.K. The High-Latitude Ionosphere and Its Effects on Radio Propagation, New 6. York: Cambridge University Press, 2003, 617 p.
- 7. Kazimirovsky E.S. Coupling from below as a source of ionospheric variability: a review, Ann. Geophys., 2002, Vol. 45, No. 1, pp. 11–29.
- Lastovicka J. Forcing of the ionosphere by waves from below, J. Atmos. and Solar-Terr. Phys., 2006, Vol. 68, 8 pp. 479-497.
- Manney G.L., Hegglin M.I., Daffer W.H., Santee M.L., Ray E.A., Pawson S., Schwartz M.J., Boone C.D., Froi-9 devaux L., Livesey N.J., Read W.G., Walker K.A. Jet characterization in the upper troposphere/lower stratosphere (UTLS): applications to climatology and transport studies, Atmos. Chem. Phys., 2011, Vol. 11, pp. 6115–6137, doi:10.5194/acp-11-6115-2011.

- 10. Plougonven R., Snyder C. Inertia-gravity waves spontaneously generated by jets and fronts. Part I: Different baroclinic life cycles, J. Atmos. Sci., 2005, Vol. 64, pp. 2502-2520.
- 11. Ratovsky K.G., Oinats A.V. Local empirical model of ionospheric plasma density derived from Digisonde mea-
- surements at Irkutsk, *Earth, Planets and Space*, 2011, Vol. 63, No. 4, pp. 351–357. Ratovsky K.G., Oinats A.V., Medvedev A.V. Regular features of the polar ionosphere characteristics from Digi-12. sonde measurements over Norilsk, Adv. Space Res., 2013, Vol. 51, No. 4, pp. 545-553.
- 13. Ratovsky K.G., Medvedev A.V., Tolstikov M.V. Diurnal, seasonal and solar activity pattern of ionospheric varia-
- Ratovský K.G., biedvedev A.V., forstkov M.V. Diana, seasonal and solar activity pattern of folospheric variability from Irkutsk Digisonde data, *Adv. Space Res.*, 2014a, http:/dx.doi.org/10.1016/j.asr.2014. 08.001.
   Ratovsky K.G., Shi J.K., Oinats A.V., Romanova E.B. Comparative study of high-latitude, mid-latitude and low-latitude ionosphere on basis of local empirical models, *Adv. Space Res.*, 2014b, Vol. 54, No. 3, pp. 509–516. 15. Rishbeth H. F-regon links with the low atmosphere?, J. Atmos. Sol.-Terr. Phys., 2006, Vol. 68, pp. 469-478.
- Vadas S.L. Horizontal and vertical propagation of gravity waves in thermosphere from lower atmospheric and 16.
- thermospheric sources, J. Geophys. Res., 2007, Vol. 112, doi:10.1029/2006JA011845. 17.
- Vincent R.A. Gravity wave coupling from below: A review, *Climate and Weather of the Sun-Earth System (CAW-SES): Selected Papers from the 2007 Kyoto Symposium.* Tokyo: TERRAPUB, 2009, pp. 279–293.
- 18. Yiğit E., Medvedev A.S. Internal wave coupling processes in Earth's atmosphere, Adv. Space Res., 2015, Vol. 55, pp. 983–1003, http:,dx.doi.org/10.1016/j.asr.2014.11.020.