

Исследование воздействия тропических циклонов на вариации параметров ионосферы в азиатском регионе России

М.А. Черниговская¹, В.И. Куркин¹, И.И. Орлов¹, Е.А. Шарков², И.В. Покровская²

¹ Институт солнечно-земной физики СО РАН,
664033 Иркутск, а/я 291

E-mail: cher@iszf.irk.ru;

² Институт космических исследований РАН,
117997 Москва, Профсоюзная 84/32

E-mail: e.sharkov@mail.ru

В работе продолжены исследования короткопериодных вариаций максимальных наблюдаемых частот (МНЧ) сигналов наклонного зондирования (НЗ), вызванных изменениями параметров верхней ионосферы в равноденственные периоды (март, сентябрь) на трассах Магадан-Иркутск, Норильск-Иркутск и Хабаровск-Иркутск в 2008-09 г. Проведенный частотный анализ выявил временные интервалы с повышенной энергетической короткопериодных колебаний, которые можно интерпретировать как проявление крупномасштабных перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ), источниками которых являются внутренние гравитационные волны (ВГВ) с периодами 1-5 часов. Обсуждается вопрос о локализации возможных источников выявленных ПИВ. В качестве потенциальных источников наблюдаемых ПИВ рассматриваются тропические циклоны. Установлено, что в периоды активного тропического циклогенеза в осенние месяцы отмечается значительное усиление энергетики короткопериодных волновых возмущений на трассах НЗ. Интенсивность наблюдаемых ПИВ уменьшается по мере удаления средних точек трасс НЗ к западу от потенциальных источников ВГВ. Для анализируемых трасс НЗ отмечается различный отклик ионосферы на прохождение волновых возмущений от одних источников ВГВ. По времени задержки прохождения ПИВ регионов средних точек разнесенных по пространству трасс НЗ оценена скорость распространения волновых возмущений. Для периодов весеннего равноденствия (март 2008-2009 гг.) также отмечаются проявления короткопериодных ПИВ во временных вариациях МНЧ в спокойных гелио-геомагнитных условиях и в отсутствие действующих ТЦ в северо-западной акватории Тихого океана, но энергетика этих волновых возмущений существенно ниже, чем для осенних сезонов разных лет.

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

Введение

Возмущения верхней атмосферы и ионосферы Земли, обусловленные воздействиями снизу (в том числе, метеорологического характера), активно изучаются экспериментально и теоретически в течение многих лет. В последние годы большое внимание уделяется изучению ионосферных возмущений в спокойных гелио-геомагнитных условиях, когда влияние, обусловленное изменениями солнечной и магнитной активности, незначительно. Источниками таких возмущений верхней атмосферы и ионосферы Земли могут быть внутренние гравитационные волны (ВГВ), распространяющиеся из нижележащих слоев атмосферы (мезосфера, стратосфера и тропосфера) и переносящие с собой момент количества движения и энергию. При определенных условиях ВГВ достигают высот максимума ионосферы (~300-350 км). Проникая на высоты ионосферы, ВГВ проявляют свои свойства в виде перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ). Теоретические расчеты и экспериментальные данные показывают, что ВГВ распространяются в горизонтальных направлениях с различными скоростями, в результате чего формируются движущиеся пакеты волн, которые могут обнаруживаться на расстояниях до нескольких тысяч километров от источника возбуждения [1-7].

В данной работе в качестве мощнейшего потенциального источника воздействия снизу рассматриваются гигантские по своей энергетике метеорологические возмущения в тропосфере – тропические циклоны, тайфуны. Известно, что прохождение фронта тропического циклона (ТЦ) может сопровождаться возбуждением ВГВ различных временных масштабов, которые могут распространяться вверх и проявляться на высотах ионосферы в виде перемещающихся ионосферных возмущений с характерными периодами (минуты-часы) [8-12]. Цель работы заключалась в исследовании возможности проявления мощных метеорологических возмущений в тропосфере Земли в вариациях ионосферных параметров в дальней от региона источника возмущения зоне.

Данные наблюдений

В работе продолжаются исследования короткопериодных (порядка десятков минут, часов) временных вариаций ионосферных параметров, полученных на сети ионозодов наклонного зондирования, вызванных изменениями параметров верхней атмосферы и ионосферы в регионах проведения радиофизических измерений [13-15].

Для анализа использовались данные наблюдений:

- временных вариаций максимальных наблюдаемых частот (МНЧ) сигналов наклонного зондирования (скважность ~5 мин) на трассах Норильск-Иркутск, Магадан-Иркутск, Хабаровск-Иркутск в равноденственные периоды (март, сентябрь) 2008-2009 гг.
- характеристик тропических циклонов из электронной базы спутниковых данных глобального тропического циклогенеза "Глобал-ТЦ" [16].

Трассы наклонного зондирования проходят в регионах Восточной Сибири и Дальнего Востока азиатской части России (рис. 1). Геометрии трасс различны; средние точки трасс (области ионосферы, в окрестности которых происходит отражение радиосигналов и которые, в основном, определяют характер вариаций параметров регистрируемых в пунктах приема сигналов) существенно разнесены по пространству. Трасса наклонного зондирования Хабаровск-Иркутск была задействована только в 2009 г., ее средняя точка наиболее близка к региону активности тропических циклонов в акватории северо-запада Тихого океана.



Рис. 1. Схема трасс наклонного зондирования

Результаты анализа данных

Частотный анализ выполнялся с помощью разработанной в ИСЗФ СО РАН методики поиска периодичностей для временных рядов [17]. Расчеты мощностей текущих спектров R_i проводились на сетке периодов $T_i = 0.5 \div 5$ час с шагом 0.5 часа. Усиление мощности спектра на определенных периодах T_i интерпретировалось как проявление ПИВ, связанных с распространением ВГВ. Решая задачу о возможности регистрации проявлений деятельности мощных ТЦ в вариациях ионосферных параметров в зоне, удаленной от региона деятельности ТЦ, существенным является вопрос о выявлении других возможных источников волновых возмущений снизу. Это могут быть землетрясения, метеорологические фронты непосредственно в регионах получения экспериментальных данных, солнечный терминатор и т.п. Доминирующим фактором в термодинамическом режиме ионосфера 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 и геомагнитный индекс K_p). Анализируемый период 2008-09 гг. характеризовался минимумом солнечной активности ($F_{10.7}$ не превышал 70 в ед. $10^{-22} \text{ Вт}/(\text{Гц}\cdot\text{м}^2)$) и геомагнитных возмущений. Это чрезвычайно благоприятствовало эффективности исследования ионосферных возмущений, связанных с влиянием внутренних атмосферных процессов (в том числе метеорологических эффектов). При анализе помимо гелио-геомагнитной возмущенности мы учитывали метеорологическую обстановку в исследуемых регионах, поскольку прохождения атмосферных фронтов также могут быть источниками ВГВ. Учитывалось время прохождения атмосферных фронтов через регионы средних точек рассматриваемых трасс НЗ. Вариации параметров атмосферы и ионосферы в этих областях существенным образом проявляются в характеристиках принимаемых радиосигналов. Для этой цели использовались композиты дистанционного мониторинга облачного покрова по данным спутника NOAA.

Траектории наиболее мощных тайфунов и супер-тайфунов категорий 4, 5, действовавших в акватории северо-запада Тихого океана в периоды проведения радиофизических измерений на трассах НЗ в сентябре 2008-09 гг., приведены на рис. 2.

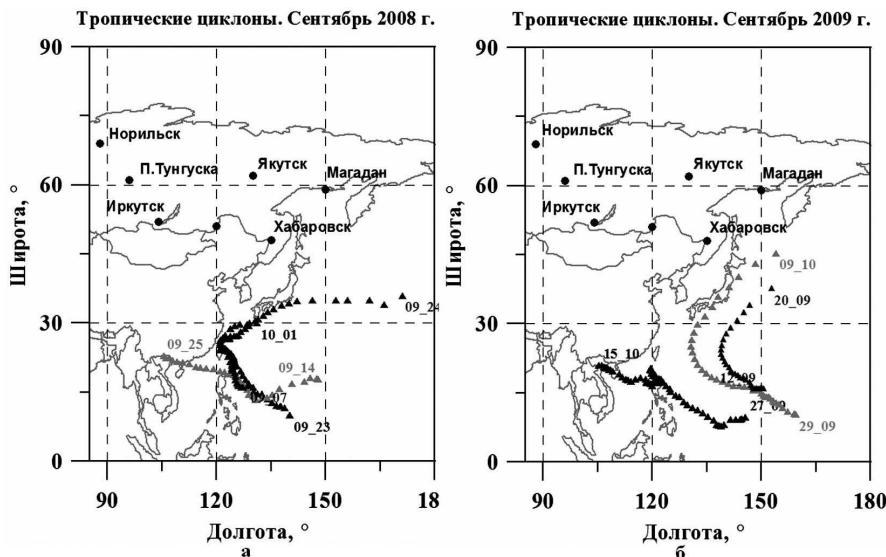


Рис. 2. Траектории тропических циклонов, действовавших в сентябре 2008 г. (а) и 2009 г. (б) в акватории северо-запада Тихого океана

На рис. 3 представлены матрицы текущих спектров МНЧ для периодов 1-5 час на широтной трассе Хабаровск-Иркутск и меридиональной трассе Норильск-Иркутск в сентябре 2009 г. На верхней панели рисунка дан график изменения индекса геомагнитной активности K_p , на временной оси которого указаны с помощью горизонтальных полос периоды действия тропических циклонов в северо-западной акватории Тихого океана (супер-тайфун Choi Wan категории 5 в соответствии со шкалой Саффира-Симпсона, 12-20/09/2009; супер-тайфун категории 4 Parma, 27/09-14/10/2009 и супер-тайфун категории 5 MELOR, 29/09-08/10/2009). Вертикальными стрелками на картах мощности спектра вариаций МНЧ указаны моменты прохождения местных метеорологических атмосферных фронтов в регионах подионосферных средних точек трасс НЗ.

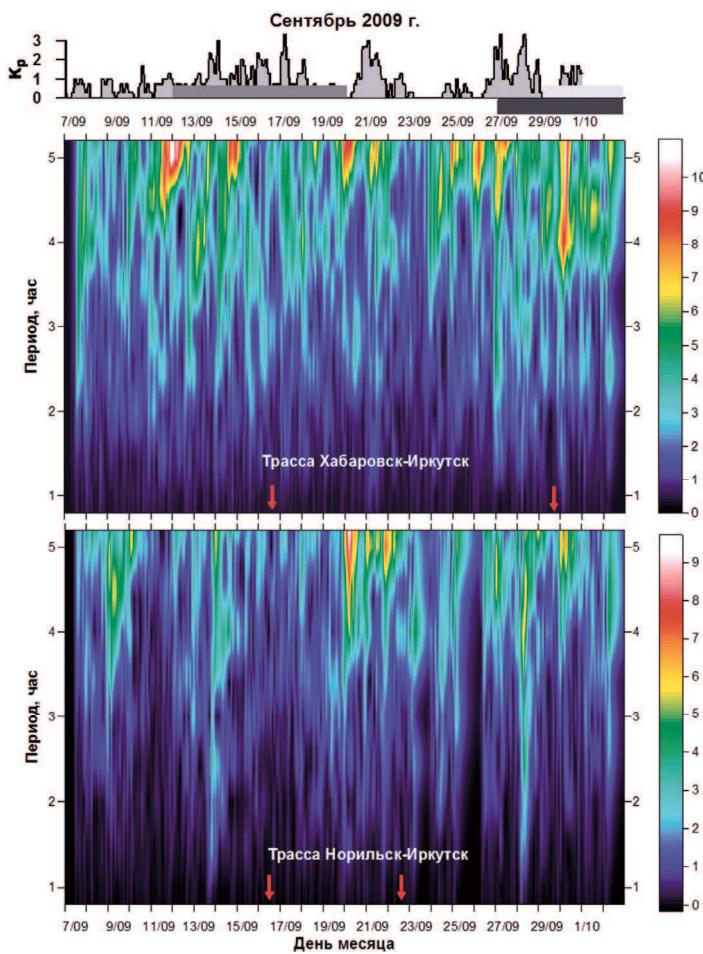


Рис. 3. Матрицы текущих спектров МНЧ для периодов 1-5 час на трассах Хабаровск-Иркутск и Норильск-Иркутск и индекс геомагнитной активности K_p в сентябре 2009 г.

Из рис. 3 видно, что проявление ПИВ не всегда связано с усилениями гелиогеомагнитной возмущенности или прохождениями в регионах средних точек трасс местных метеорологических фронтов. Не связаны эти ПИВ и с прохождением солнечного терминатора, так их длительность – порядка суток и более. Если источниками наблюдаемых ПИВ являются ТЦ, действующие в северо-западной акватории Тихого океана, то для анализируемых трасс НЗ отклик ионосферы на прохождение волновых возмущений от одних источников ВГВ различен. Прежде всего, это, очевидно, связано с различной удаленностью средних точек трасс НЗ от потенциальных источников ВГВ. Существует, по-

видимому, связь и с геометрией трасс, а также с тем, что сам источник ВГВ в процессе развития ТЦ, изменяется по интенсивности и меняет свои координаты (стадии развития и траектории движения ТЦ). Поэтому существует зависимость от угла между направлением распространения волнового возмущения и линией, соединяющей средние точки трасс НЗ.

Из предположения о том, что источником наблюдаемых ПИВ по данным МНЧ сигналов наклонного зондирования на рассматриваемых трассах служат волновые пакеты, генерируемые прохождением фронта мощного ТЦ в северо-западной акватории Тихого океана, была предпринята попытка оценить скорость распространения ПИВ. На рис. 4,б приведены временные зависимости мощностей текущих спектров R_i для периода $T_i = 5$ час для 12-20 сентября 2009 г. в период действия супер-тайфуна 5 (наивысшей) категории Choi Wan (рис. 4,а). Расстояние между средними точками трасс Хабаровск-Иркутск и Норильск-Иркутск (пунктирная линия на карте рис. 4,а) составляет ~ 1800 км. Задержка между последовательными прохождениями ПИВ региона средней точки трассы Хабаровск-Иркутск, а затем региона средней точки трассы Норильск-Иркутск составляет $\Delta t \approx 3 \div 6$ час. Соответственно, скорость распространения ПИВ может составлять величину от 170 до 90 м/с. Полученные оценочные значения согласуются с результатами экспериментальных и теоретических оценок скоростей распространения ВГВ. По теоретическим оценкам [3] скорость ВГВ от импульсного источника может составлять величину до 200-300 м/с. По экспериментальным оценкам [1] скорость ВГВ может составлять \sim нескольких десятков до сотни м/с.

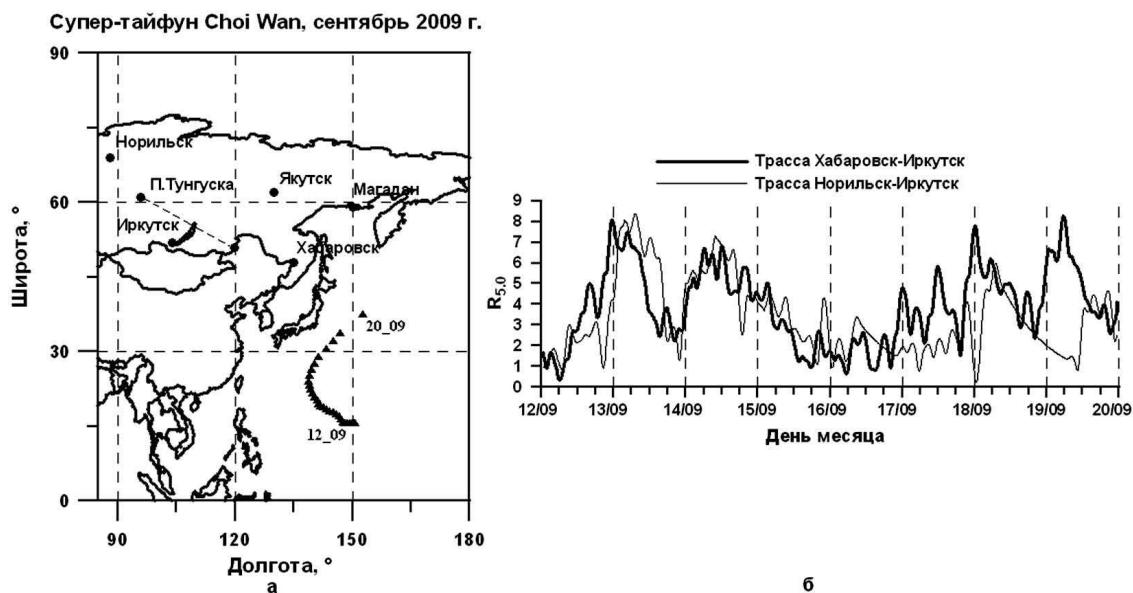


Рис. 4. Траектория движения ТЦ Choi Wan (а) и временные зависимости мощностей текущих спектров R_i для периода $T_i = 5$ час на трассах Хабаровск-Иркутск и Норильск-Иркутск (б) в период 12-20 сентября 2009 г.

Аналогичный частотный анализ данных МНЧ сигналов НЗ для рассматриваемых трасс был выполнен также для периодов близких весеннему равноденствию (март-апрель 2008-09 гг.). В эти периоды не было ТЦ в северо-западной акватории Тихого океана. Полученные спектры вариаций МНЧ сигналов НЗ для весны, когда циклоническая активность в северо-западной акватории Тихого океана отсутствовала, в спокойных гелио-геомагнитных условиях можно рассматривать как "фоновые". Проведено сравнение фоновых спектров со спектрами амплитуд возмущений, полученными в периоды активной дея-

тельности тропического циклогенеза в сентябре. В весенние месяцы также отмечались ПИВ с периодами 1-5 час, но их энергетика была значительно слабее (в полтора-два раза) по сравнению с энергетикой ПИВ в осенние периоды (рис. 5). Этот факт дает основание отметить, что при прочих аналогичных условиях наличие мощных действующих тропических циклонов (даже в достаточно удаленной зоне), может рассматриваться как потенциальный источник короткопериодных волновых возмущений ионосферных параметров.

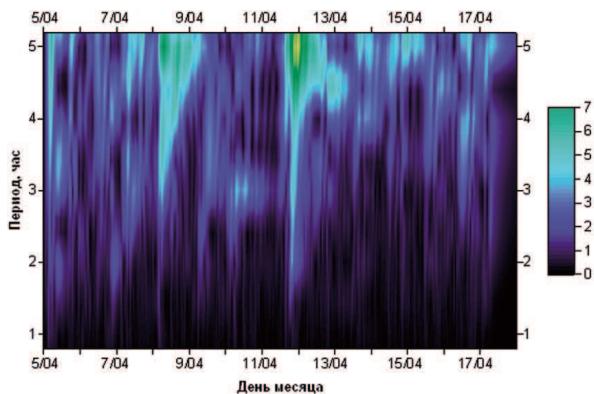


Рис. 5. Матрица текущего спектра МНЧ для периодов 1-5 час на трассе Магадан-Иркутск в апреле 2009 г.

Выводы

Проведенный частотный анализ выявил временные интервалы с повышенной энергетикой короткопериодных колебаний данных МНЧ сигналов НЗ на трассах Магадан-Иркутск, Норильск-Иркутск и Хабаровск-Иркутск для равноденственных периодов 2008-09 гг., которые можно интерпретировать как проявление ПИВ, источниками которых являются ВГВ с периодами 1-5 часов.

1. Обнаруженные ПИВ не связаны с проявлениями гелио-геомагнитной возмущенности (2008-09 гг. характеризуются минимумом солнечной активности и спокойной геомагнитной обстановкой). Не всегда выявленные ПИВ совпадают по времени с прохождением местных метеорологических фронтов в регионах средних точек трасс НЗ, а также не связаны с прохождением солнечного терминатора.

2. В периоды активной деятельности тропических циклонов (сентябрь 2008-09 гг.) в акватории северо-запада Тихого океана отмечено значительное усиление энергетики короткопериодных волновых возмущений на трассах Хабаровск-Иркутск, Магадан-Иркутск и Норильск-Иркутск. Интенсивность наблюдаемых ПИВ уменьшается по мере удаления средних точек трасс НЗ к западу от потенциальных источников ВГВ.

3. Отмечается различный отклик ионосфера на прохождение волновых возмущений от одних источников ВГВ для анализируемых трасс НЗ. По-видимому, это связано с различной геометрией трасс НЗ, а также с тем, что сам рассматриваемый источник ВГВ в процессе развития ТЦ, изменяется по интенсивности и меняет свои координаты.

4. По времени задержки прохождения ПИВ регионов средних точек разнесенных по пространству трасс НЗ оценена скорость распространения волновых возмущений, составляющая величину ~90-170 м/с.

5. Анализ событий повышенной энергетики короткопериодных колебаний МНЧ для равноденственных периодов 2008-2009 гг. показал различия в амплитудах мощности

спектров вариаций МНЧ в полтора-два раза для весеннего и осенних сезонов разных лет. Выявленные различия энергетики исследуемых короткопериодных колебаний для разных сезонов и лет могут быть, на наш взгляд, связаны с возможными различиями в условиях распространения волновых возмущений в атмосфере, а также с особенностями формирования, развития, перемещения конкретных тропических циклонов в рассматриваемые периоды времени, и как следствие этих особенностей – различными эффектами воздействия ТЦ на вышележащую атмосферу.

В заключение работы следует отметить, что интенсивность ионосферных возмущений метеорологического происхождения значительно ниже интенсивностей возмущений, вызванных вариациями гелио- и геомагнитной активности (воздействие внешнего фактора), что существенно затрудняет исследование эффектов воздействия со стороны нижних слоев атмосферы. Тот факт, что приведенные в статье результаты относятся к условиям минимума солнечной активности при низкой геомагнитной возмущенности, дает основание предполагать, что обнаруженные в работе ионосферные эффекты вполне могут быть связаны с влиянием метеорологических факторов (действием мощных тропических циклонов в северо-западной акватории Тихого океана).

В рамках настоящей работы для некоторых ПИВ не удалось идентифицировать потенциальные источники ВГВ. Возможно, эти ПИВ связаны с откликами ионосферы на сезонные перестройки динамического режима верхней атмосферы в рассматриваемые равноденственные периоды. Таким образом, необходимы дальнейшие систематические исследования в этой актуальной области исследований.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 09-05-00760_а и 09-05-01019-а.

Литература

1. *Hocke K., Schlegel K.* A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982-1995 // Ann. Geophys., 1996. Vol. 14. P. 917-940.
2. Ахмедов Р.Р., Куныцын В.Е. Моделирование ионосферных возмущений, вызванных землетрясениями и взрывами // Геомагнетизм и аэрономия, 2004. Т. 44. № 1. С. 105-112.
3. Куныцын 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.
4. Ерохин Н.С., Михайлова Л.А., Шалимов Л.С. Прохождение крупномасштабных внутренних гравитационных волн на ионосферные высоты через ветровые структуры в нижней и средней атмосфере // Геофизические исследования, 2007. Вып. 7. С. 53-64.
5. 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.
6. Куныцын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С. Радиотомография ионосферы // М.: Физматлит, 2007. 336 с.
7. Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли // Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАН, 2006. 480 с.
8. Fabric C.-M., Greg R., Laurent R., Jean L. Gravity wave characteristics over Tromelin Island during the passage of cyclone Hudah // Geophys. Res. Lett., 2002. Vol. 29. No. 6. P. 18/1-18/4.
9. Bishop R.L., Aponte N. 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.
10. Zuo Xiao, Sai-guan Xiao, Yong-qiang Hao, Dong-he Zhang Morphological features of ionospheric response to typhoon // J. Geophys. Res., 2008. Vol. 112. No. A4. A04304.

11. Perevalova N.P., Polekh N.M. An investigation of the upper atmosphere response to cyclones using ionosonde data in Eastern Siberia and the Far East // Proc. of SPIE, 2008. V. 7296. P. 72960J1-72960J11. doi: 10.1117/12.823814.
12. Ишин А.Б., Войков С.В., Перевалова Н.П., Зализовский А.В., Сотин А.А. Вариации ионосферных параметров, наблюдавшиеся во время мощных ураганов 2005 г. вблизи атлантического побережья США // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Сборник научных статей. – М.: ООО "Азбука-2000", 2009. Вып. 6, Т. 2. С. 274-279.
13. Черниговская М.А., Шарков Е.А., Куркин В.И., Орлов И.И., Покровская И.В. Исследование временных вариаций ионосферных параметров в регионе Сибири и Дальнего Востока // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Сборник научных статей. – М.: ООО "Азбука-2000", 2008. Вып. 5. Т. 1. С. 567-574.
14. Черниговская М.А., Шарков Е.А. и др. Короткопериодные временные вариации ионосферных параметров в регионе Сибири и Дальнего Востока // Исследование Земли из космоса, 2008. № 6. С. 17-24.
15. Черниговская М.А., Куркин В.И., Орлов И.И., Шарков Е.А., Покровская И.В. Совместный анализ короткопериодных временных вариаций ионосферных параметров в регионе Сибири и Дальнего Востока и процессов тропического циклогенеза // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Сборник научных статей. – М.: ООО "Азбука", 2009. Вып. 6. Т. 2. С. 324-332.
16. Покровская И.В., Шарков Е.А. Тропические циклоны и тропические возмущения Мирового океана: хронология и эволюция. Версия 3.1. (1983-2005 гг.) // М.: Полиграф сервис, 2006. 728 с.
17. Орлов И.И., Ильин Н.В. О текущих спектрах сигналов // Радиолокация. Навигация. Связь / Под ред. Борисова В.И. Воронеж: Изд-во ВГУ, 2000. Т.1. С. 361-365.

Researching the influence of tropical cyclones on variations of ionospheric parameters in the Asian region of Russia

M.A. Chernigovskaya¹, V.I. Kurkin¹, I.I. Orlov¹, E.A. Sharkov², I.V. Pokrovskaya²

¹ Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk

E-mail: cher@iszf.irk.ru ;

² Space Research Institute RAS, Moscow

E-mail: e.sharkov@mail.ru

This article continues the researching of short-period variations of maximum observed frequencies (MOF) of oblique sounding (OS) signals along the Norilsk–Irkutsk, Magadan–Irkutsk, and Khabarovsk–Irkutsk paths in East Siberia and the Far East obtained at equinoxes (March, September) in 2008–2009. A frequency analysis has revealed time intervals with enhanced intensity of short-period oscillations which may be interpreted as manifestations of large-scale traveling ionospheric disturbances (TIDs) whose sources were internal gravity waves (IGWs) with periods of 1–5 hours. The question concerning localization of possible sources of revealed disturbances is discussed. Troposphere meteorological disturbances giant in their energy (tropical cyclones, typhoon) are considered as potential sources of observable TIDs. A considerable increase in the energy of short-period wave disturbances was observed along the OS paths during active tropical cyclogenesis in September 2008–2009. The intensity of the observed TIDs decreased as the midpoints of the OS paths moved westward away from the potential IGW sources. Ionospheric responses to wave disturbance propagation from the same IGW sources differ in the OS paths under analysis. The wave disturbance propagation velocities were estimated from the delay in TID passage in the regions of the midpoints of the spaced-apart OS paths. Short-period TIDs can also be observed at the spring equinox in March 2008–2009 under quiet helio-geomagnetic conditions and in the absence of active tropical cyclones in the north-west Pacific, but their energy is much lower than during the autumns of various years.

Keywords: upper and middle atmosphere, ionosphere, coupling of the atmospheric layers, wave disturbances, tropical cyclones.