

Метеорологические эффекты в ионосфере по данным декаметрового радара SuperDARN Хоккайдо

А.В. Ойнац¹, В.И. Куркин¹, N. Nishitani², М.А. Черниговская¹

¹ *Институт солнечно-земной физики СО РАН
664033, Иркутск, Лермонтова, 126а, а/я 291
E-mail: oinats@iszf.irk.ru*

² *Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University
F3-3 (250), Chikusa-ku, Furo-cho Nagoya 464-8601, Japan
E-mail: nishitani@stelab.nagoya-u.ac.jp*

В работе анализируются данные наблюдений на декаметровом радаре SuperDARN Хоккайдо, полученные в сентябре 2008 и 2009 годов в режиме возвратно-наклонного зондирования ионосферы. Исследуются эффекты перемещающихся ионосферных возмущений (ПИБ) среднего и крупного масштаба. Приводятся оценки основных параметров ПИБ, а также обсуждается их связь с сильными тропическими циклонами, действовавшими в северо-западной акватории Тихого Океана в период наблюдений.

Ключевые слова: перемещающиеся ионосферные возмущения, возвратно-наклонное зондирование, диагностика ионосферных возмущений, SuperDARN, тропические циклоны, тайфуны.

Введение

Экспериментальные и теоретические исследования возмущений ионосферы, вызванных процессами в тропосфере, ведутся в течение многих лет (Fritts, 1989; Hines, 1960; Hocke, 1996; Kazimirovsky, Herraiz, 2003; Laštovička, 2006; Rishbeth, 2006). Среди механизмов воздействия выделяют волновой механизм, когда в результате мощных метеорологических явлений в тропосфере возбуждаются внутренние гравитационные волны (ВГВ), которые распространяются вверх и достигают при определенных условиях высот максимума ионосферы. На высотах ионосферы ВГВ могут распространяться в горизонтальных направлениях на тысячи километров и проявляются экспериментально в виде перемещающихся ионосферных возмущений (ПИБ) (Куницын и др., 2007). Так, например, известно, что такие мощные метеорологические явления как тропические циклоны почти всегда сопровождаются ПИБ различных масштабов (Ming, Chen, 2010; Xiao и др., 2007; Перевалова и др., 2011; Черниговская и др., 2008, 2011).

Одним из эффективных наземных средств для диагностики ПИБ являются радары SuperDARN. SuperDARN (Super Dual Auroral Radar Network [<http://superdarn.jhuapl.edu>]) — это сеть радаров когерентного обратного рассеяния, излучающих в коротковолновом диапазоне (8...20 МГц) (Chisham et al., 2007). SuperDARN - это международный проект, в котором активно участвуют более 10 стран. В настоящее время имеется 14 радаров в Северном полушарии и 7 в Южном. Диаграмма направленности антенны отдельного радара SuperDARN фазируется в 16 азимутальных направлениях - лучах. Ширина луча в азимутальной плоскости составляет 3,24°. Зондирование ведется на фиксированной частоте, при этом последовательно сканируются все 16 лучей. Временное разрешение на каждом луче порядка 1 мин. Таким образом, сектор обзора отдельного радара SuperDARN составляет ~52°, причем по дальности зона регистрации радара простирается от нескольких сотен до нескольких тысяч километров (дальность первого скачка).

Основную информацию для радаров SuperDARN несет сигнал в виде когерентного эха, рассеянный обратно вытянутыми вдоль линий магнитного поля ионосферными неоднородностями декаметрового масштаба. В то же время, практически постоянно в данных радаров присутствует сигнал, обратнo рассеянный от шероховатостей земной поверхности, т. е. сигнал возвратно-наклонного зондирования (ВНЗ), который можно использовать для диагно-

стики ПИВ среднего и крупного масштаба. Эффекты ПИВ в данных радаров SuperDARN проявляются в квазипериодических временных вариациях мощности, доплеровской скорости, угла прихода и минимального группового пути сигнала ВНЗ. Данные вариации обусловлены явлениями фокусировки и дефокусировки сигнала, в результате отражения от областей с пониженной и повышенной электронной концентрацией, которые возникают при распространении ПИВ в секторе обзора радара.

В данной работе приводятся результаты анализа данных японского радара SuperDARN, расположенного на о. Хоккайдо (Япония), за сентябрь 2008 и 2009 гг. с целью поиска возможных проявлений в них деятельности тропических циклонов (тайфунов), действовавших в северо-западной акватории Тихого океана.

Описание геофизической обстановки и данных наблюдений

В рассматриваемый период времени по данным сайта Unisys Weather [<http://weather.unisys.com>] в северо-западной акватории Тихого океана действовали 15 тропических циклонов (без учета тропического шторма KROVANH (12W), который закончился в первой половине суток 01.09.2009). Из них 7 циклонов действовали в сентябре 2008, и 8 — в сентябре 2009 г. Из всех циклонов для анализа были выбраны только самые сильные, которые характеризовались категорией 4 (тайфун) или 5 (супертайфун) по шкале ураганов Саффир-Симпсона. В сентябре 2008 г. действовали два тайфуна категории 4 SINLAKU (15W) и HAGUPIT (18W), и один супертайфун JANGMI (19W). А в сентябре 2009 г. действовал супертайфун CHOI-WAN (15W). В табл. 1 представлены основные характеристики циклонов, такие как дата появления и разрушения, максимальная скорость и минимальное давление. На рис. 1 показаны траектории перемещения центров циклонов в течение времени их жизни. Треугольником черного цвета на рисунке показано место расположения радара, а линиями, исходящими от него, показано направление лучей, составляющих его сектор обзора. Для того чтобы исключить возможное влияние геомагнитной активности и солнечных вспышек, для анализа были выбраны дни со спокойными гелио и геомагнитными условиями. Предпочтение также отдавалось дням, когда тропический циклон достигал своих экстремальных параметров, и дням, когда он приближался к береговой линии или пересекал ее (Xiao et al., 2007). Учитывая сказанное выше, для более детального исследования были выбраны три дня: 13 и 24 сентября 2008 г., а также 18 сентября 2009 г.

Таблица 1. Тропические циклоны категории 4 и 5 в сентябре 2008 и 2009 гг.

№	Название циклона	Дата появления	Дата разрушения	Скорость ветра, м/с	Давление, мм.рт.ст.
15W	SINLAKU	07.09.2008	21.09.2008	64	929
18W	HAGUPIT	17.09.2008	25.09.2008	64	929
19W	JANGMI	23.09.2008	01.10.2008	72	918
15W	CHOI-WAN	11.09.2009	20.09.2009	72	918

На рис. 2 приведены зависимости мощности принимаемого сигнала ВНЗ от группового пути и времени суток, измеренные на радаре SuperDARN Хоккайдо в указанные дни для одного из лучей. Как хорошо видно, несмотря на спокойную гелио и геомагнитную обстановку (в указанные дни индекс Kp не превышал 1, а индекс $Ae < 100$ нТл), в данных присутствуют отчетливые эффекты ПИВ с различными периодами, соответствующими среднему и крупному масштабу. ПИВ проявляются в виде отдельных цугов (см. рис. 2а) и модуляции зависимости минимального группового пути от времени (рис. 2б и в).

Необходимо отметить, что рассматриваемый регион находится в зоне повышенной сейсмической активности, землетрясения здесь случаются постоянно и также могут являться источниками ПИВ различных масштабов. По данным геологической службы США [<http://>

earthquake.usgs.gov/] в выбранные дни (и дни предшествовавшие) в окрестности радиусом 3000 км от зоны регистрации радара было зафиксировано множество толчков с магнитудой от 3,1 до 5,9. Самое сильное землетрясение с магнитудой 5,9 было зафиксировано 12 сентября 2008 г. в 23:07 UT с очагом, расположенным на удалении ~1200 км к северо-востоку от зоны регистрации радара. Как установлено ранее другими авторами, для землетрясений с магнитудой меньше 6,5 заметной реакции ионосферы не наблюдается (Жеребцов и др., 2010). Таким образом, рассматриваемые в данной работе ионосферные эффекты вероятнее всего не связаны с сейсмической активностью в регионе. Более определенно об источнике можно говорить после оценки параметров ионосферных возмущений (скорости и азимута распространения), что является возможным, так как эффекты, подобные показанным на рисунке 2, одновременно наблюдались и на других лучах радара.

Методика оценки параметров ПИВ

Оценка основных параметров ПИВ по данным радара SuperDARN проводилась с использованием методики (Ойнац и др., 2011), которая основывается на анализе вариаций минимального группового пути принимаемого сигнала ВНЗ в течение суток на разных лучах. Локальные максимумы и минимумы в таких вариациях соответствуют увеличению/уменьшению высоты отражения сигнала в ионосфере. Приближенно можно считать, что отражение сигнала происходит в средней точке трассы зондирования, а значит, указанные вариации несут информацию о динамических процессах в ее окрестности. Как показывает моделирование (Ойнац и др., 2010), при распространении ПИВ в зоне обзора радара SuperDARN должны наблюдаться схожие вариации минимального группового пути сигнала ВНЗ на разных лучах. Так как ПИВ пересекает разные лучи в разные моменты времени, то локальные экстремумы, соответствующие одной и той же «фазе» возмущения, в вариациях на разных лучах сдвинуты относительно друг друга. Определив координаты средних точек в эти моменты времени, можно оценить направление и скорость распространения возмущения.

Если предположить, что в зоне обзора радара фронт ПИВ является плоским, а сферичностью Земли можно пренебречь, то моменты времени наблюдения локальных экстремумов, соответствующих одной «фазе» возмущения, на i -м и j -м лучах будут связаны выражением (Ойнац и др., 2011)

$$t_j = t_i + \frac{1}{v} \left[(x_j - x_i) \sin \alpha + (y_j - y_i) \cos \alpha \right] = t_{ji}(\alpha, v), \quad (1)$$

где (x_i, y_i, t_i) и (x_j, y_j, t_j) — координаты средних точек (долгота и широта) и моменты наблюдения экстремумов на i -м и j -м лучах соответственно; v и α — скорость и азимут распространения возмущения. Учитывая приближенный характер принятых предположений, а также погрешности при определении средних точек трасс при реальных измерениях, оценка параметров возмущений проводится путем минимизации методом наименьших квадратов невязки между измеренными и теоретически рассчитанными по формуле (1) моментами времени

$$\delta(\alpha, v) = \sum_{j,i=0, j \neq i}^{15} (t'_j - t_{ji}(\alpha, v))^2, \quad (2)$$

где t'_j — измеренные моменты времени. Параметры v и α , соответствующие минимальному значению невязки (2), принимаются в качестве оценки скорости и направления распространения ПИВ.

Отметим, что точность определения параметров существенно зависит от взаимного расположения средних точек на разных лучах. Например, если окажется, что все средние точки расположены на одной прямой, то очевидно, что мы не сможем однозначно определить направление распространения возмущения.

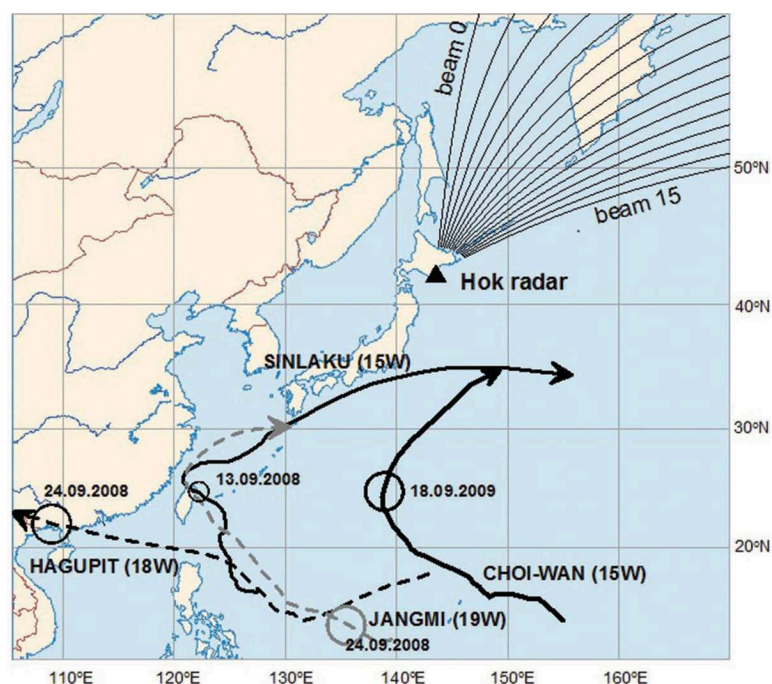


Рис. 1. Траектории движения мощных тропических циклонов в северо-западной акватории Тихого океана в сентябре 2008 и 2009 гг. Окружностями показано положение циклонов в конкретные дни. Место расположения радара SuperDARN Хоккайдо отмечено черным треугольником, а линиями, выходящими из него, показан его сектор обзора

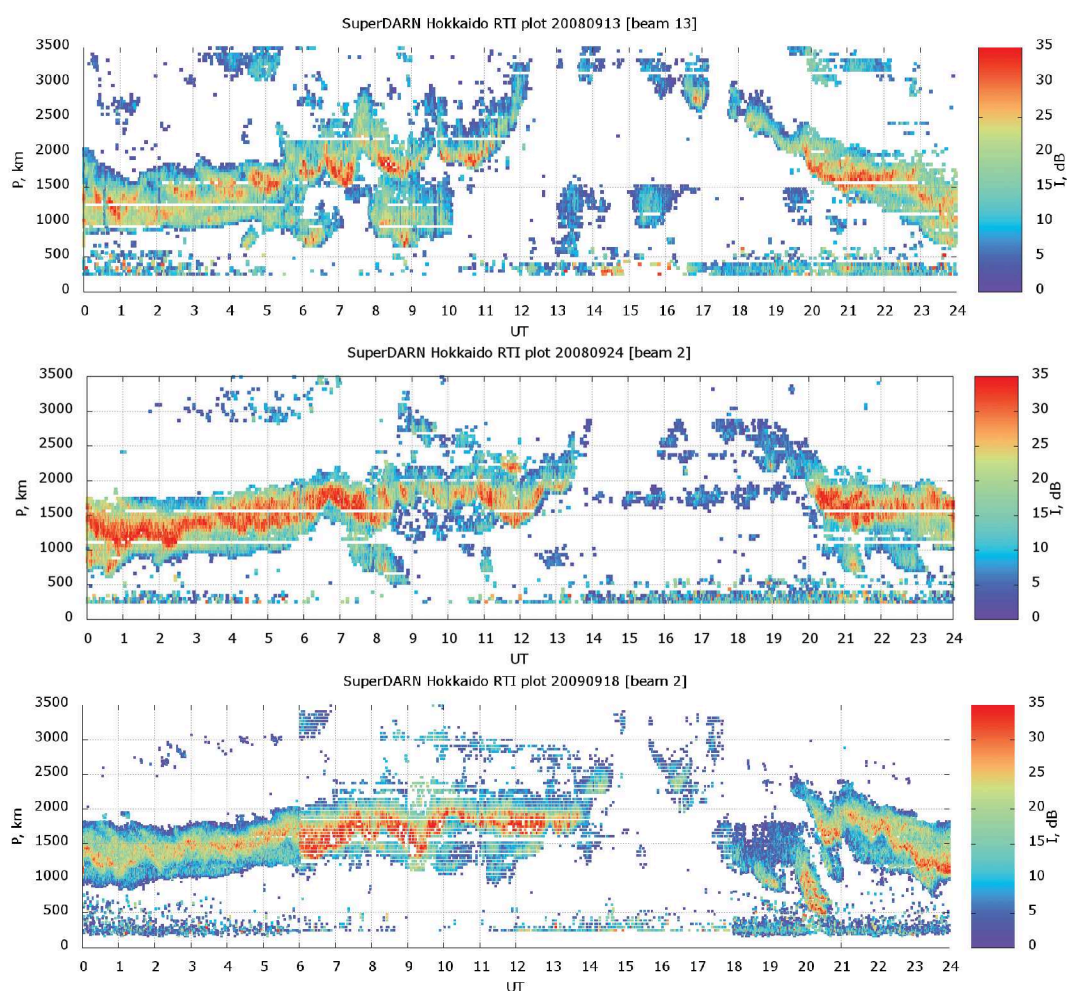


Рис. 2. Мощность (I , дБ) принимаемого радаром сигнала ВНЗ в зависимости от группового пути (P , км) и времени суток (UT), измеренная: а — 13.09.2008 на луче 13; б — 24.09.2008 на луче 2; в — 18.09.2009 на луче 2

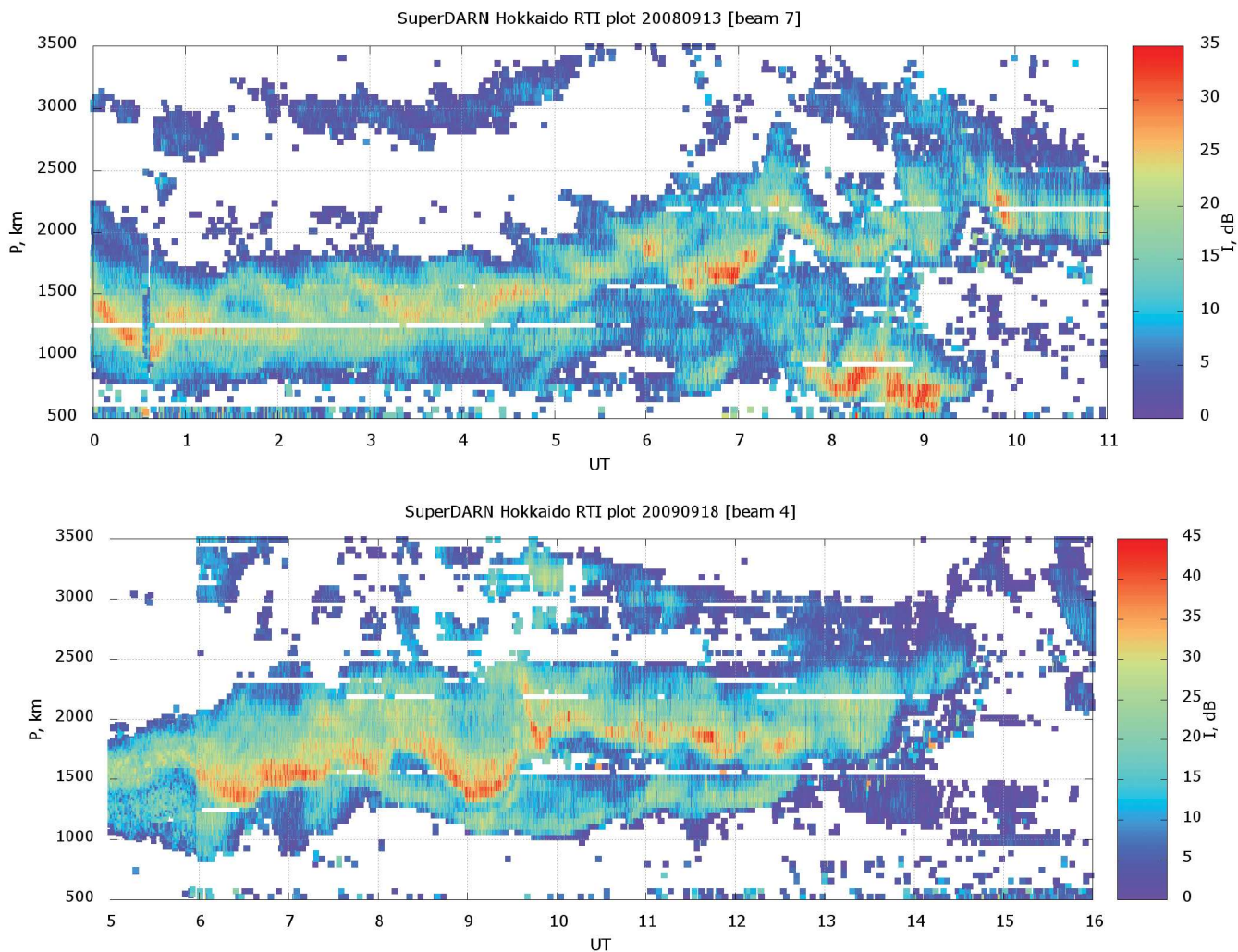


Рис. 3. Мощность (I , дБ) принимаемого радаром сигнала ВНЗ в зависимости от группового пути (P , км) и времени суток (UT), измеренная: а — 13.09.2008 на луче 7; б — 18.09.2009 на луче 4

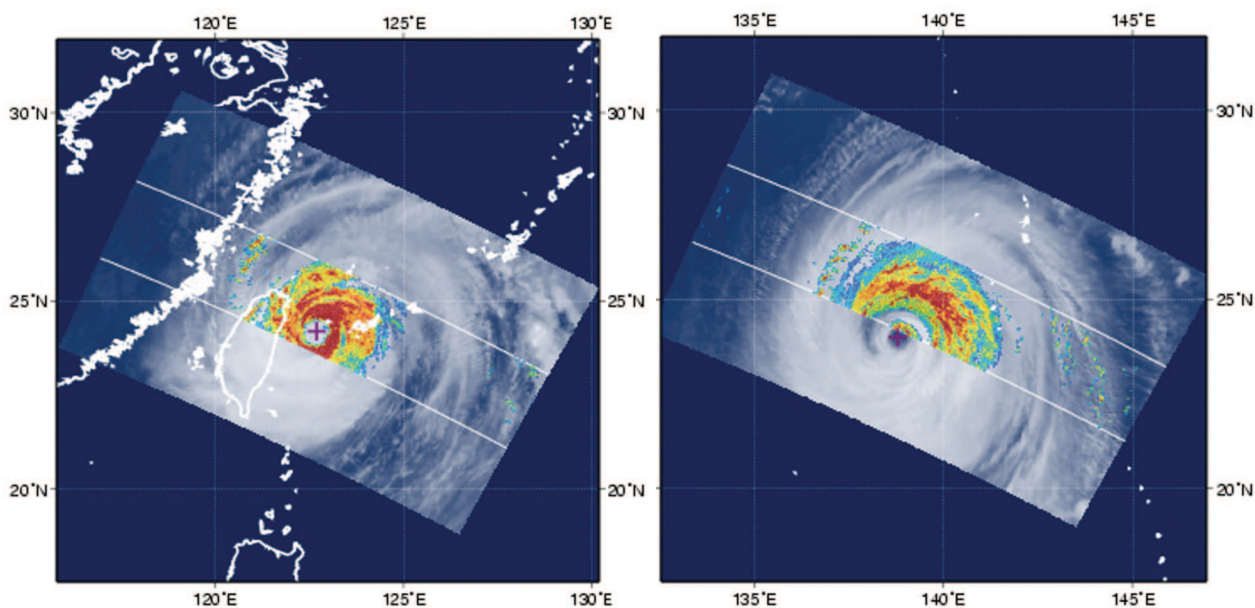


Рис. 4. Снимки со спутника TRMM тропических тайфунов: а — SINLAKU 13.09.2008 02:00 UT б — CHOI-WAN 18.09.2009 06:00 UT. Цветом на фотографии показан уровень осадков (мм/ч)

Результаты и их обсуждение

На рисунке 2а приведены данные радара за 13.09.2008 для луча 13. Отчетливо видны вариации мощности принимаемого сигнала в виде отдельных цугов. Временной интервал между цугами изменяется от 1 ч в 00:00 UT до 2 ч в 11:00 UT. Отметим, что для некоторых цугов имеются «парные» сигналы в окрестности 04:00, 06:00 и 08:00 UT, с задержками в 2 раза меньше. Наиболее вероятно, что эти «парные» сигналы появились в результате непосредственного прямого отражения назад на резких градиентах электронной концентрации (как от зеркальной стенки). Для подтверждения данного предположения необходимо более детальное исследование, в том числе и с проведением численного моделирования, что не является целью данной статьи. Оценки параметров ПИВ по описанной методике показали, что в секторе обзора радара одновременно присутствует несколько ионосферных возмущений с разными масштабами, а полная картина возмущенности представляет собой их суперпозицию. Сложная картина возмущений особенно отчетливо видна в более крупном масштабе на рис. 3а для луча 7. Нами были выделены две основные группы возмущений. Преимущественное направление распространения первой группы с периодом около 2 ч соответствовало направлению на север (азимут $\sim 0^\circ$), а скорость составляла ~ 200 м/с. Вторая группа возмущений с периодом около 1 часа преимущественно распространялась на северо-восток (азимут $\sim 40^\circ$) со скоростью ~ 100 м/с.

Необходимо отметить, что генерация ВГВ в тропических циклонах возникает вследствие атмосферной турбулентности (Дробязко, Красильников, 1985; Черногор, 2006). Теоретические оценки показывают (Черногор, 2006), что размер ядра тропического циклона, эффективно излучающего ВГВ, примерно равен удвоенному радиусу глаза циклона. Причем выделяются два периода, на которых интенсивность излучения циклона резко возрастает. Это период ~ 6 мин, соответствующий частоте Брента–Вяйсяля, и период $T \sim 0.6R_0/V_0$, где V_0 — горизонтальная скорость ветра; R_0 — внешний радиус циклона. Однако высокочастотные ВГВ быстро затухают. Таким образом, на удалении в несколько тысяч километров циклон можно рассматривать как точечный источник ВГВ с преобладающим периодом, зависящим от горизонтальной скорости ветра и величины внешнего радиуса циклона.

На рис. 4а приведена спутниковая фотография тайфуна SINLAKU, сделанная 13.09.2008 спутником TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission [<http://sharaku.eorc.jaxa.jp/>]). Диаметр глаза на этой фотографии составляет около 1° (~ 110 км), а внешний радиус около 3° (~ 330 км). Расстояние от центра тайфуна SINLAKU до места регистрации радаром составляет ~ 3500 км, ожидаемый азимут направления распространения ПИВ в секторе обзора радара должен составлять $34 \pm 6^\circ$, а преобладающий период около 1 ч (скорость к 13.09.2008 упала до ~ 50 м/с). Таким образом, вторая группа наблюдаемых ПИВ действительно могла быть вызвана деятельностью тайфуна SINLAKU. При распространении со скоростью 100 м/с возмущения достигнут зоны регистрации примерно через 10 ч, что вполне соотносится со временем наблюдения эффектов ПИВ на радаре.

На рис. 2б приведены данные радара за 24.09.2008 для луча радара 2. Как видно из рисунка, наблюдались вариации минимального группового пути принимаемого сигнала ВНЗ. Кроме крупных периодов 1 и 2 ч присутствуют и более короткопериодные вариации ~ 30 минут. Оценка параметров ПИВ, как и в первом случае, показала присутствие возмущений, распространяющихся на север (азимут $\sim 5^\circ$) со скоростями ~ 100 м/с. Что не совпадает с ожидаемым азимутом ПИВ для тайфуна HAGUPIT $38 \pm 5^\circ$. Также маловероятно, что источником наблюдаемых ПИВ является супертайфун JANGMI: хотя ожидаемый азимут для него в рассматриваемый день составлял $13 \pm 5^\circ$ (см. рис. 1), сам тайфун только набирал свою силу.

На рис. 2в приведены данные радара за 18.09.2009 для луча 2. Также отчетливо проявились вариации минимального группового пути принимаемого сигнала ВНЗ. Оценка показала, что ПИВ, наблюдаемые до 06:00 UT, в основном движутся в направлении на юго-восток

со скоростями $\sim 100 \dots 200$ м/с и, скорее всего, связаны с процессами в полярной ионосфере. Начиная с 6 UT, наблюдались возмущения, распространяющиеся на север (азимут $\sim 2^\circ$) со скоростями от $\sim 100 \dots 300$ м/с. Этот интервал суток в более крупном масштабе показан на рис. 3б для луча 4. Отчетливо проявляется период ПИВ ~ 45 мин. Ожидаемый азимут направления распространения ПИВ от супертайфуна CHOI-WAN составлял $13 \pm 6^\circ$, а расстояние от центра до зоны регистрации ~ 2900 км. По спутниковой фотографии супертайфуна CHOI-WAN на рисунке 4б можно оценить внешний радиус тайфуна ~ 400 км, поэтому преобладающий период генерируемых им ВГВ составлял ~ 50 минут. Таким образом, данные возмущения после 06:00 UT вполне могут быть обусловлены деятельностью супертайфуна CHOI-WAN. При распространении со скоростью $\sim 100 \dots 300$ м/с возмущение достигнет зоны регистрации примерно через $\sim 2,5 \dots 8$ ч, что также соотносится со временем наблюдения эффектов ПИВ на радаре.

Заключение

В работе проведен анализ характеристик сигнала ВНЗ, измеренных на радаре SuperDARN Хоккайдо в сентябре 2008 и 2009 гг. Анализ показал, что несмотря на спокойную в целом геомагнитную обстановку в указанный период в данных радара присутствует значительное количество признаков ПИВ различных масштабов. Оценки параметров выборочных крупномасштабных и среднемасштабных возмущений показали, что помимо обычного для наблюдаемых в средних широтах ПИВ направления распространения с севера на юг, присутствуют также возмущения с преимущественным направлением распространения в секторе обзора радара на север и северо-восток. Проведенное сопоставление рассчитанных параметров ПИВ с теоретическими оценками характеристик ВГВ для тайфуна SINLAKU и супертайфуна CHOI-WAN, действовавших на тот момент времени в северо-западной акватории Тихого океана, показало хорошее согласие между ними.

Авторы выражают благодарность Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) и Unisys Weather за возможность использовать данные из архивов по тропическим циклонам. Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 12-05-92103-ЯФ_а и 12-05-00865_а) и Министерства образования и науки РФ (ГК № 16.518.11.7097).

Литература

1. Дробязко И.Н., Красильников В.Н. Генерация акустико-гравитационных волн атмосферной турбулентностью // Известия ВУЗов. Радиофизика. 1985. Т. 28. № 11. С. 1357–1365.
2. Жеребцов Г.А., Перевалова Н.П., Астафьева Э.И. и др. Исследование геодинамических и ионосферных возмущений во время Култукского землетрясения 27 августа 2008 г. // Журн. радиоэлектроники. Материалы Российской научной конф. «Зондирование земных покровов радарными с синтезированной апертурой». Улан-Удэ, 2010. С. 205–219.
3. Куницын В.Е., Сураев С.Н., Ахмедов Р.Р. Моделирование распространения акустико-гравитационных волн в атмосфере для различных поверхностных источников // Вестн. Московского ун-та. Сер. 3. Физика. Астрономия. 2007. № 2. С. 59–63.
4. Ойнац А.В., Куркин В.И., Пономарчук С.Н. и др. О диагностике ПИВ по данным радаров декаметрового диапазона // Журн. радиоэлектроники. Материалы Российской научной конф. «Зондирование земных покровов радарными с синтезированной апертурой». Улан-Удэ, 2010. С. 435–450.
5. Ойнац А.В., Кутелев К.А., Куркин В.И. и др. Исследование ПИВ на основе данных радара SuperDARN Хоккайдо и Российской сети ЛЧМ ионозондов в северо-восточном регионе России // Тр. 23-й Всерос. научной конф. «Распространение радиоволн». Йошкар-Ола, 2011. С. 247–250.

6. *Перевалова Н.П., Полякова А.С., Ишин А.Б. и др.* Сравнительный анализ вариаций ионосферных и метеорологических параметров над зонами действия тропических циклонов Rita (18–26.09.2005) и Wilma (15–25.10.2005) // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2011. Т. 8. № 1. С. 303–312.
7. *Черниговская М.А., Куркин В.И., Орлов И.И. и др.* Вариации ионосферных параметров в азиатском регионе России в период деятельности тропических циклонов // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2011. Т. 8. № 1. С. 319–327.
8. *Черниговская М.А., Шарков Е.А., Куркин В.И. и др.* Короткопериодные временные вариации ионосферных параметров в регионах Сибири и Дальнего востока // *Исследования земли из космоса*. 2008. № 6. С. 17–24.
9. *Черногор Л.Ф.* Тропический циклон как элемент системы Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера // *Космічна наука і технологія*. 2006. Т. 12. № 2/3. С. 16–36.
10. *Chisham G., Lester M., Milan S.E. et al.* A decade of the Super Dual Auroral Radar Network (SuperDARN): scientific achievements, new techniques and future directions // *Surveys in Geophysics*. 2007. V. 28. N. 1. P. 33–109.
11. *Fritts D.* A review of gravity wave saturation processes, effects, and variability in the middle atmosphere // *Pure and Applied Geophysics*. 1989. V. 130. N. 2/3. P. 343–371.
12. *Hines C.* Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights // *Canadian J. Physics*. 1960. V. 38. N. 11. P. 1441–1481.
13. *Hocke K.* A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982–1995 // *Annales Geophysicae*. 1996. N. 14. P. 917–940.
14. *Kazimirovsky E., Herraiz M.* Effects on the ionosphere due to phenomena occurring below it // *Surveys in geophysics*. 2003. N. 24. P. 139–184.
15. *Laštovička J.* Forcing of the ionosphere by waves from below // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2006. V. 68. N. 3–5. P. 479–497.
16. *Ming F., Chen Z.* Analysis of gravity-waves produced by intense tropical cyclones // *Annals of Geophysics*. 2010. N. 2003. P. 531–547.
17. *Rishbeth H.* F-region links with the lower atmosphere? // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2006. V. 68. N. 3–5. P. 469–478.
18. *Xiao Z., Xiao S.-guan, Hao Y.-qiang et al.* Morphological features of ionospheric response to typhoon // *Journal of Geophysical Research*. 2007. V. 112. N. A4. P. 1–5.

Meteorological effects in the ionosphere by SuperDARN Hokkaido HF radar

A.V. Oinats¹, V.I. Kurkin¹, N. Nishitani², M.A. Chernigovskaya¹

¹ *Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS
664033, Irkutsk, Lermontov, 126a, P.O. box 291
E-mail: oinats@iszf.irk.ru*

² *Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University
F3-3 (250), Chikusa-ku, Furo-cho Nagoya 464-8601, Japan
E-mail: nishitani@stelab.nagoya-u.ac.jp*

SuperDARN HF Hokkaido radar ground backscatter data measured during September 2008 and September 2009 are analyzed in the paper. The effects of traveling ionospheric disturbances (TIDs) of large– and medium scales are studied. The main TIDs parameters are estimated and the links with powerful tropical cyclones in the North Western Pacific occurred during the period of observation are discussed.

Keywords: traveling ionospheric disturbances, ground backscatter sounding, diagnostics of the ionospheric disturbances, SuperDARN, tropical cyclones, typhoons.