

УДК 550.388.2

ВЛИЯНИЕ ТРОПИЧЕСКОГО ЦИКЛОНА НА ВЕРХНЮЮ ИОНОСФЕРУ ПО ДАННЫМ ТОМОГРАФИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ НАД О-ВОМ САХАЛИН В НОЯБРЕ 2007 г.

© 2011 г. Л. Б. Ванина-Дарт¹, А. А. Романов², Е. А. Шарков¹

¹Учреждение РАН Институт космических исследований, г. Москва

²ОАО “Российская корпорация ракетно-космического приборостроения и информационных систем”, г. Москва
e-mail: vandart@iki.rssi.ru

Поступила в редакцию 15.01.2010 г.

После доработки 13.12.2010 г.

В работе рассмотрены данные томографического зондирования за первую половину ноября 2007 г. Зондирование проводилось над тремя пунктами, расположенными на одном меридиане: Южно-Сахалинск (47° N, 143° E), Поронайск (49° N, 143° E), и Ноглики (51° N, 143° E) в целях поиска возможного влияния тропического циклона на верхнюю ионосферу. Возможным откликом верхней ионосферы, локализуемой над зоной тропического циклона (в данном случае на 25–30° севернее и 5–20° восточнее) на расстоянии приблизительно от 3800 до 5500 км от нее, является изменение параметра $foF2$ в среднем не более чем на 10–20%. Уменьшение или, наоборот, повышение $foF2$ связано с “задержкой” момента измерений по отношению к началу действия ТЦ. Сложности морфологического анализа данного явления заключаются в том, что тропический циклон является “широкополосным” (в долготном направлении, и в меньшей степени в широтном направлении) и длительным источником возмущения.

1. ВВЕДЕНИЕ

Изучение атмосферно-ионосферных взаимодействий является одним из самых интересных и перспективных прикладных направлений в геофизике. В силу своей природы, являясь продуктом ионизации различных нейтральных газовых составляющих, ионосфера Земли достаточно быстро (например, на высотах E -слоя характерное время реакции на изменение скорости ионизации авроральными электронами дискретного типа исчисляется секундами) реагирует на изменения космического излучения, а также состава нейтральной атмосферы. Соответственно, отклонения в поведении ионосферных параметров обнаруживаются вследствие атмосферных явлений (грозы, циклоны, шквалы, ураганы и т.д.). В последнее время много внимания уделяется такому тропосферному явлению, как тропический циклон (ТЦ). Точки зрения о его возможном влиянии на ионосферу расходятся. Если в одних работах авторы находят возможный отклик тропических циклонов в нижней [Михайлов и др., 2005; Ванина-Дарт и др., 2007а; 2007б; 2008], верхней [Вауер, 1957; 1958; Shen, 1982] и даже во внешней ионосфере [Mikhailova et al., 2002], то, например, в работе [Афраймович и др., 2008] отклик не обнаружен. Несмотря на то, что поиски результатов взаимодействия “тропический циклон-ионосфера” ведутся с середины прошлого столетия, количество работ на эту тему невелико. Конечно, это

связано не только с нехваткой соответствующих данных, но и с отсутствием надежного теоретического механизма такого взаимодействия. Тем не менее, поиск в этом направлении продолжается (в большей степени в работах ученых Китая, например, [Tian et al., 2009]).

Предыдущие работы авторов этой статьи были посвящены проявлениям ТЦ в нижней ионосферной области D . В них был предложен вариант гипотетического физического механизма “быстрых” взаимодействий тропосферных возмущений с состоянием ионосферы – внутренние гравитационные волны (ВГВ), порождаемые ТЦ.

Данные, используемые в настоящей работе, были получены методом фазоразностной томографии. Отличительной особенностью метода ионосферной томографии на базе сигналов низкоорбитальных навигационных систем является возможность выявления вариаций электронной концентрации ионосферы, вызванных, например, распространением сильных циклонов в тропосфере Земли, чего принципиально нельзя достигнуть только с использованием глобальных спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС и GPS. В отличие от фазовой томографии, где интегральной величиной является полная фаза, фазоразностный метод является более чувствительным к относительно малым неоднородностям электронной концентрации, которые вносят не-

значительный вклад в фазу, и более существенный – в ее производную.

Целью данной работы является поиск возможного влияния ТЦ на верхнюю ионосферу на основе томографических данных, полученных на о-ве Сахалин за 2007 г. Наблюдения проводилось над тремя пунктами, расположенными на одном меридиане: Южно-Сахалинск (47° N, 142° E), Поронайск (49° N, 143° E) и Ноглики (51° N, 143° E).

2. БАЗА ДАННЫХ И МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

2.1. Описание метода

Теоретической основой лучевой радиотомографии являются известные соотношения [Андреева и др., 1992; Куницын и др., 2007] для фаз и амплитуд радиоволн в приближении геометрической оптики. Следующая пара равенств определяет линейные интегралы от распределений электронной концентрации и эффективной частоты соударений ν :

$$\phi = \lambda r_e \int N_e d\sigma, \quad (1)$$

$$\chi = -\frac{\lambda r_e}{\omega} \int N_e \nu d\sigma, \quad (2)$$

где λ – длина зондирующей волны; r_e – классический радиус электрона; $\omega = kc$, k – волновое число в свободном пространстве; c – скорость света; $\int d\sigma$ – символ интегрирования по пути распространения сигналов. Линейными интегралами здесь являются разность фаз $\phi = \Phi_0 - \Phi$ и уровень χ – логарифм соотношения амплитуд сигналов $\chi \sim \ln(A/A_0)$ измеряемого поля ($E = A \exp(i\Phi)$) и поля зондирующей волны ($E_0 = A_0 \exp(i\Phi_0)$).

В процессе исследований вычисляется линейный интеграл (1), умноженный на константу порядка единицы [Куницын и др., 2007], связанную с пересчетом фазы с одной частоты на другую. Основа возникающих трудностей по определению этого интеграла состоит в том, что величина фазы весьма велика. Для характерных значений $N_e \sim 10^{12} \text{ м}^{-3}$, $\lambda = 2 \text{ м}$, и длин луча в ионосфере порядка тысячи километров ϕ составляет тысячи радиан.

Отсюда возникает проблема выделения начальной фазы, остающейся постоянной в течение сеанса радиопросвечивания $\phi_0 = 2\pi l$, которую необходимо прибавить к измеряемой (в пределах 2π) $\Delta\phi$ и получить абсолютную (полную) $\phi = \phi_0 + \Delta\phi$ или линейный интеграл (1) [Андреева и др., 1992; Куницын и др., 2007].

Для решения проблемы неизвестной начальной фазы авторами [Андреева и др., 1992; Куницын и др., 2007] был предложен метод фазоразностной томографии, суть которого состоит в использо-

вании в качестве интегральной характеристики производной фазы $d\phi/dt$ (которая, очевидно, не содержит неизвестную константу, соответствующую начальной фазе сигнала). В отличие от фазовой томографии, где интегральной величиной является полная фаза, фазоразностный метод является более чувствительным к относительно малым неоднородностям электронной концентрации, которые вносят незначительный вклад в фазу, и более существенный – в ее производную. В реконструкциях поля электронной концентрации, выполненных с использованием метода фазовой томографии, не проявляются детали размером менее нескольких сотен километров, в то время как фазоразностная томография позволяет хорошо восстанавливать структуры размером 100 км и величиной электронной концентрации 4–6% от максимальной концентрации [Андреева и др., 1992; Куницын и др., 2007]. Таким образом, метод фазоразностной томографии является достаточно точным и эффективным для реконструкции распределения электронной концентрации в ионосфере [Андреева и др., 1992; Куницын и др., 2007; Романов и др., 2008].

Математическая постановка задачи подразумевает дискретизацию набора интегралов вида (1) и (2) и последующее решение системы линейных уравнений $Ax = b$, где A – матрица аппроксимации проекционного оператора, b – вектор измеренных значений и x – вектор восстанавливаемых значений электронной концентрации.

В соответствии с приведенными в работе [Куницын и др., 2007] оценками, использование метода ионосферной томографии на базе сигналов низкоорбитальных навигационных систем позволяет восстановить вертикальное распределение N_e , вдоль траектории пролета спутника с разрешением не менее $\Delta\tau = 20 \times 10 \text{ км}$. Следовательно, появляется возможность выявления вариаций N_e ионосферы, вызванных распространением сильных циклонов в тропосфере Земли, чего принципиально нельзя достигнуть только с использованием глобальных спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС и GPS.

2.2. Результаты численного моделирования реконструкции распределения электронной концентрации в ионосфере

Для оценки качества обработки данных радиопросвечивания с использованием предложенной в работе [Урличич и др., 2006] методики были проведены реконструкции модельного распределения электронной концентрации в ионосфере с помощью разработанного программно-математического комплекса [Романов и др., 2008] для условий, идентичных реальной геометрии эксперимента, описанной в работах [Романов и др., 2008; Урличич и др., 2006].

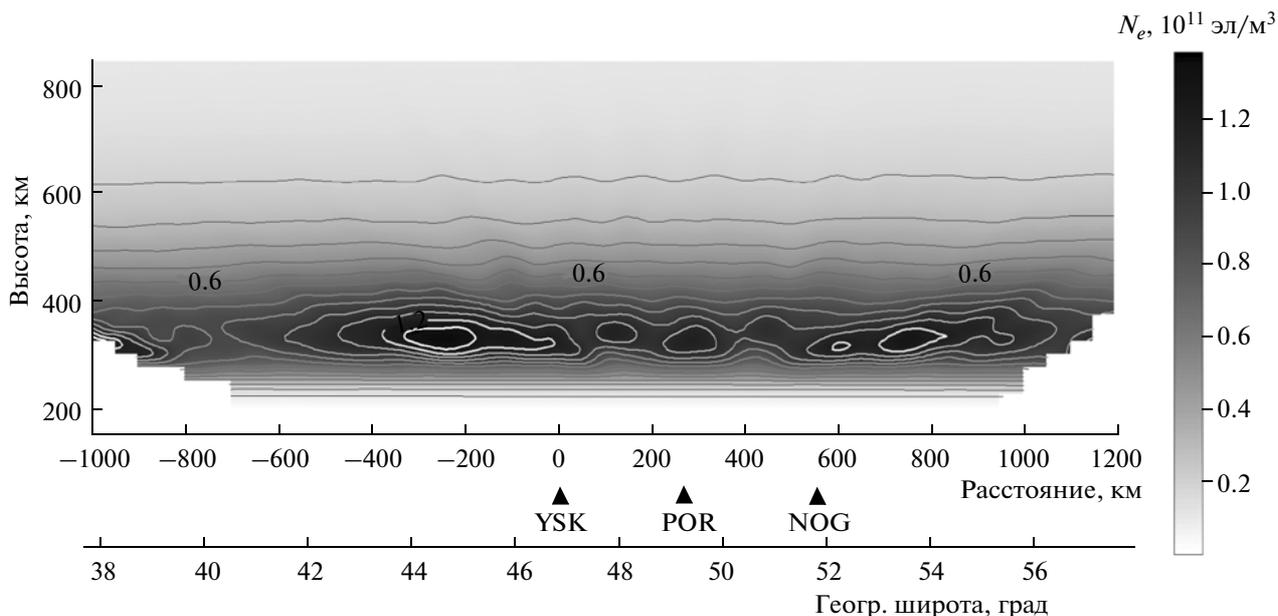


Рис. 1. Распределение электронной концентрации 29.07.2007 г. 00:30 (LT) в районе о-ва Сахалин, где YSK – пункт Южно-Сахалинск, POR – пункт Поронайск, NOG – пункт Ноглики.

Ошибки реконструкции оценивались путем расчета невязки между исходной и восстановленной функциями и определялись следующими соотношениями [Куницын и др., 2007]:

$$\delta_2 = \frac{\sqrt{\sum_i (F_i - \tilde{F}_i)^2}}{\sqrt{\sum_i F_i^2}}; \quad \delta_m = \frac{\max_i |F_i - \tilde{F}_i|}{\max_i |F_i|},$$

где F – значение исходной и \tilde{F} – значение восстановленной функции.

Результаты исследования показали, что при реконструкции модельного распределения, описывающего возмущенное состояние ионосферы (наличие неоднородностей и горизонтального градиента электронной концентрации), ошибки восстановления значений электронной концентрации характеризуются величинами $\delta_2 = 0.08$ и $\delta_m = 0.10$.

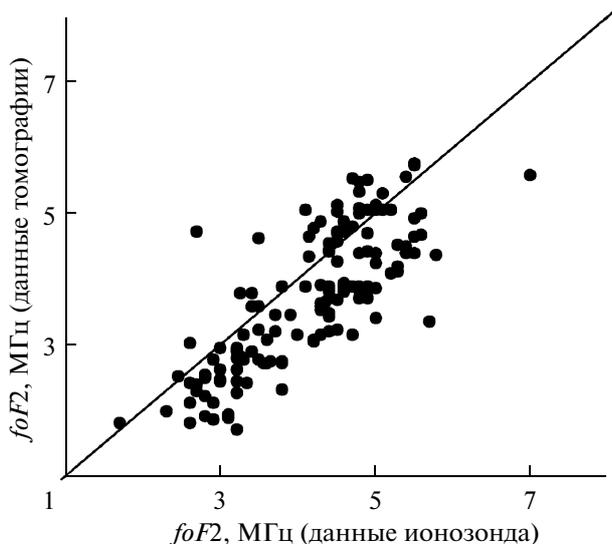


Рис. 2. Сопоставление значений критической частоты $foF2$, полученных в результате томографии ионосферы, с данными ионозонда Вакканай.

2.3. Результаты экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования надежности работы разработанной системы сбора и обработки данных радиопросвечивания ионосферы проводились с использованием сети приемных установок, расположенных на о-ве Сахалин [Романов и др., 2008; Урличич и др., 2006].

Результаты работы системы сбора и обработки данных радиопросвечивания ионосферы представляют собой высотно-широтное распределение электронной концентрации (рис. 1). На рисунке 2 представлены результаты сравнения данных, полученных ионозондом Вакканай (Wakkanai), расположенным на о-ве Хоккайдо, в 150 км к югу от томографической цепочки, с данными, полученными в результате работы программно-математического комплекса.

При анализе использовались данные 90 реконструкций, 50 из которых были получены в июле–августе 2007 г., и 40 – в январе 2008 г. Для сопоставления с данными ионозонда максимальные значения электронной концентрации в районе

Таблица 1. Гелиогеомагнитная обстановка на время проведения томографического зондирования

Дата измерения N_e	Время измерения N_e , UT	$F10.7$	Dst , нТл	Kp
05.11	02.25	66	-2	1
	03.50		0	
07.11	21.17	67	2	0
	23.06		5	
08.11	02.05	68	8	0
	03.24		11	
11.11	01.45	68	-1	0
	02.57		-2	

расположения ионозонда пересчитывались в значения критической частоты $foF2$.

Показано хорошее соответствие результатов определения $foF2$, средняя невязка составила 15%, $\delta_2 = 0.13$. Коэффициент корреляции между двумя рядами данных $R = 0.84$. Эти результаты хорошо согласуются с оценками точности реконструкции электронной концентрации на основе данных ионозондов, полученными в независимых исследованиях ($\delta_2 = 0.9-0.11$) [Куницын и др., 2007].

Независимые оценки были получены с применением фазоразностного подхода и без использования автоматизированной методики обработки. Согласованность этих результатов свидетельствует о том, что разработанная методика позволяет в автоматизированном режиме восстанавливать распределение электронной концентрации в ионосфере с точностью, характерной для метода фазоразностной томографии.

3. АНАЛИЗ ДАННЫХ ТОМОГРАФИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ, ПОЛУЧЕННЫХ В ПЕРВОЙ ПОЛОВИНЕ НОЯБРЯ 2007 г.

Анализ ионосферных данных является многопараметрической задачей. Электронная концентрация в области F зависит от: зенитного угла Солнца (время суток), сезона, гелиогеомагнитной обстановки и др. параметров. А, учитывая положение о-ва Сахалин, мы должны иметь информацию о сейсмической активности в рассматриваемом регионе. В последние десятилетия уделяется много внимания вопросу взаимодействия слоев “литосфера–атмосфера–ионосфера”, и было доказано, что процессы в литосфере оказывают электродинамическое воздействие на ионосферу. В работах [Липеровский и др., 1992; Гохберг и др., 1983; Пулинец и др., 1998; 2002; Pulnests and Boyarchuk, 2004] перечислены основные характеристики ионосферных предвестников сильных землетрясений. Так, например, полученные в работе [Смирнов, 2011] результаты показывают, что в эпицентральной области за 3–5 сут до землетрясения наблюдается рост элек-

тронной концентрации в максимуме слоя $F2$ с дальнейшим ее уменьшением за 1–3 сут. При этом накануне землетрясения (за 1–2 сут) происходит нарушение пространственно-временного хода максимума электронной концентрации.

Для обнаружения возможного “чистого” эффекта влияния ТЦ на ионосферу было решено отбросить данные с наличием сейсмических событий и представить для анализа в настоящей работе только те серии съемок, когда в области приемных установок радиопросвечивания ионосферы длительное время отсутствовали землетрясения. На сайте www.sakhmeteo.ru Сахалинской Гидрометеослужбой представлены сейсмические данные, которые использовались в данной работе. В ноябре 2007 г. землетрясения в районе о-ва Сахалин отсутствовали. С учетом этого фактора авторы рассмотрели 4 серии съемок, которые были проведены в первой половине ноября 2007 г. В таблице 1 представлена информация о гелиогеомагнитной обстановке для этих серий томографического зондирования. В таблице для каждой съемки представлены: индекс солнечной активности $F10.7$, индексы геомагнитной активности Dst и Kp . Как видно из таблицы, обстановка для данных моментов времени была очень спокойной, соответственно, влиянием со стороны гелиогеомагнитной активности на изменение слоя $F2$ можно пренебречь.

В таблице 2 представлены географическое положение, скорость ветра и стадия тропических циклонов, самых близких по расположению к о-ву Сахалин. Также в таблице представлены даты и время измерений данных о ТЦ. Более полную информацию об этих ТЦ можно найти по адресу <http://weather.unisys.com/hurricane/>. Мы же выбрали ту часть информации, которая является более интересной и значимой.

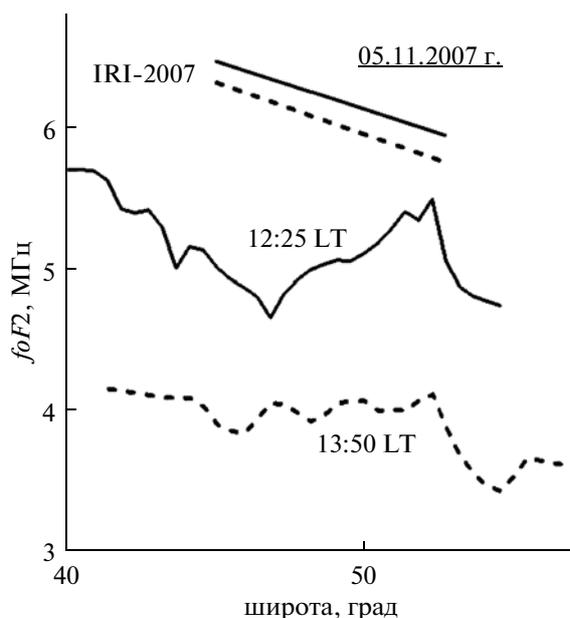
Для анализа мы взяли данные за 5, 7, 8 и 11 ноября 2007 г. В эти дни в западной части Тихого океана действовали два ТЦ. Информация о них представлена в таблицах 3 и 4. В качестве исследуемого параметра был выбран параметр $foF2$ – критическая частота слоя $F2$. Все съемки томо-

Таблица 2. Данные о ТЦ, которые находились вблизи от места и на дату (или около) проведения томографического зондирования

Дата измерения N_e , дд.мм	Данные о ТЦ				
	Широта, град	Долгота, град	Время, мм/дд/чч	(UT) Скорость ветра, узел	Стадия ТЦ
05.11	16.8	122.5	11/04/12	33	T-1
07.11	18.0	116.2	11/07/06	33	T-1
08.11	16.8	114.1	11/08/00	21	TS
11.11	20.0	139.9	11/11/06	15	TD

графического зондирования были проведены в один сезон. Землетрясения в этот период в районе о-ва Сахалин отсутствовали долгое время. Также 5, 8 и 11 ноября можно пренебречь зависимостью N_e от положения Солнца – съемки проводились около местного полудня. Безусловно, сопоставлять результаты было бы корректнее в полночь, поскольку процесс дневной ионизации (в основном зависит от излучения Солнца в коротковолновом диапазоне) во много раз менее чувствителен к помехам со стороны других источников ионизации. Тем не менее, были получены следующие морфологические результаты в диапазоне широт 45–53° N (был выбран именно этот диапазон, поскольку он присутствует во всех результатах съемок). Для анализа мы выбрали параметр $foF2$.

5 ноября съемка происходила с интервалом 1 ч 25 мин (рис. 3). В диапазоне широт 45–53° N изменение параметра $foF2$ в первой серии съемки (12:25 LT) имело среднее значение 5.04 МГц, а во второй (13:50 LT) – 3.98 МГц. Максимумы были зарегистрированы со значением 5.47 МГц (в 12:25 LT)

**Рис. 3.** Широтная зависимость критической частоты $foF2$, измеренной 5 ноября 2007 г. над о-вом Сахалин.

и 4.09 МГц (в 13:50 LT). Коэффициент корреляции между измерениями серий в указанном широтном диапазоне $R = 0.38$ (количество измерений – 18). Также на рис. 3 представлены модельные широтные зависимости $foF2$ (сплошная линия соответствует времени 12:25 LT, штриховая линия – 13:50 LT). Модельные линии были построены с помощью международной ионосферной модели IRI-2007 (http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri_vitmo.html).

7 ноября (рис. 4) съемка происходила и интервалом 1 ч 49 мин. В диапазоне широт 45–53° N параметр $foF2$ изменялся со средними значениями 2.90 МГц (в 07:17 LT) и 4.03 МГц (в 09:06 LT). Максимумы были зарегистрированы со значением 3.07 МГц (в 07:17 LT) и 4.35 МГц (в 09:06 LT). $R = 0.16$ (количество измерений – 17).

8 ноября (рис. 5) съемка происходила с интервалом 1 ч 19 мин. В диапазоне 45–53° N критическая частота слоя $F2$ изменялась как в 12:05 LT, так и в 13:24 LT со средними значениями 5.33 МГц и 4.63 МГц. Максимумы были зарегистрированы со значениями 5.74 МГц (в 12:05 LT) и 5.0 МГц (в 13:24 LT). $R = 0.94$ (количество измерений – 18).

11 ноября (рис. 6) съемка происходила и интервалом 1 ч 12 мин. В диапазоне широт 45–53° N параметр $foF2$ изменялся как в 11:45 LT, так и в 12:57 LT со средними значениями 5.25 МГц и 4.81 МГц. Максимумы были зарегистрированы со значением 5.39 МГц (в 11:45) и 5.46 МГц (в 12:57) $R = 0.26$ (количество измерений – 18).

На рисунке 7 представлены зависимости параметра $foF2$ (измеренного около местного полудня) от широты для 5, 8, 11 ноября 2007 г. Как мы отмечали выше, кривая, полученная в 13:50 LT 5 ноября, сильно отличается от других (~ в 1.5 раза меньше по значению). Известны работы, в которых уменьшение $foF2$ связывают с прохождением ТЦ. Полученный нами результат подтверждает факт уменьшения $foF2$, что подчеркивает его важность. Отметим, что 5 ноября ТЦ в первой стадии локализовался приблизительно на 30° южнее и на 20° западнее от места получения экспериментальных данных в горизонтальной проекции над о-вом Сахалин. Также стоит отметить, что практически за полуторачасовой интервал съемок критическая частота слоя $F2$ достигла максимального

Таблица 3. Данные о прохождении тропического циклона 1–10 ноября 2007 г. над акваторией Западного Тихого океана

№ п/п	Широта, град	Долгота, град	Время, мм:дд:чч (УТ)	Скорость ветра, узел	Стадия троп. циклона
1	17.7	132.90	11:01:18	15	ТД
2	18.0	132.60	11:02:00	15	ТД
3	18.3	132.30	11:02:06	20	ТД
4	18.5	131.40	11:02:12	15	ТД
5	18.8	130.50	11:02:18	20	ТД
6	18.4	129.60	11:03:00	20	ТД
7	18.2	128.50	11:03:06	25	ТД
8	18.1	127.20	11:03:12	35	ТШ
9	17.5	126.10	11:03:18	45	ТШ
10	17.0	124.90	11:04:00	50	ТШ
11	16.8	123.60	11:04:06	60	ТШ
12	16.8	122.50	11:04:12	65	Т-1
13	17.2	120.90	11:04:18	65	Т-1
14	17.5	120.00	11:05:00	55	ТШ
15	17.6	119.60	11:05:06	55	ТШ
16	17.7	119.20	11:05:12	55	ТШ
17	18.0	118.80	11:05:18	60	ТШ
18	18.4	118.60	11:06:00	70	Т-1
19	18.6	118.40	11:06:06	75	Т-1
20	18.7	118.20	11:06:12	75	Т-1
21	18.5	117.70	11:06:18	75	Т-1
22	18.3	117.10	11:07:00	70	Т-1
23	18.0	116.20	11:07:06	65	Т-1
24	17.6	115.40	11:07:12	55	ТШ
25	17.3	114.70	11:07:18	50	ТШ
26	16.8	114.10	11:08:00	40	ТШ
27	16.3	113.40	11:08:06	35	ТШ
28	15.8	112.80	11:08:12	35	ТШ
29	14.8	112.20	11:08:18	35	ТШ
30	13.7	111.60	11:09:00	30	ТД
31	12.6	111.40	11:09:06	25	ТД
32	12.2	111.10	11:09:12	25	ТД
33	11.8	110.30	11:09:18	25	ТД
34	11.5	109.60	11:10:00	20	ТД
35	11.5	108.50	11:10:06	20	ТД

различия в 1.35 раза в районе 51.5° N и минимального – в 1.15 раза в районе 47° N. На рисунках 6 и 7 также обращает на себя внимание факт явного возмущения (“вздутия”) $foF2$, зафиксированного

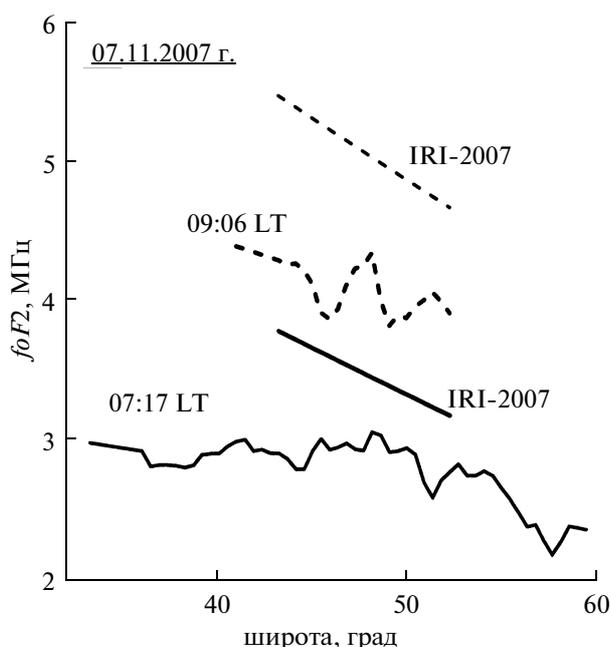
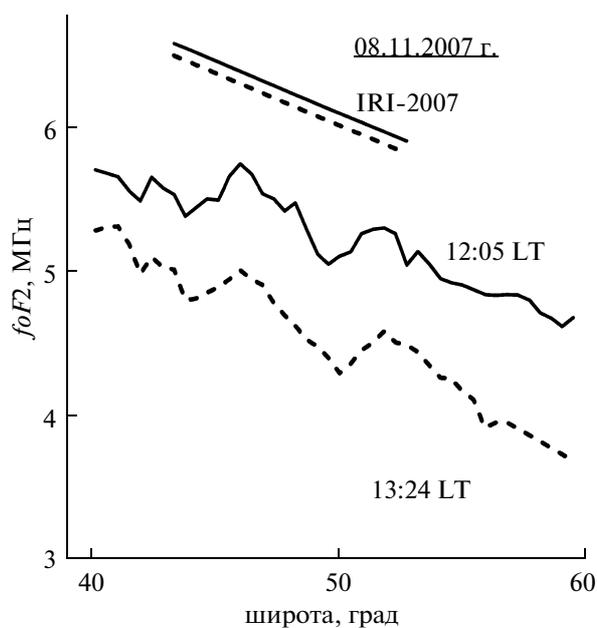
11 ноября. Съемка, как отмечалось выше, проходила с интервалом чуть более одного часа. При этом критическая частота, полученная в первой серии в 11:45 LT, несколько (не более чем на 10%)

Таблица 4. Данные о прохождении тропического циклона 9–12 ноября 2007 г. над акваторией Западного Тихого океана

№ п/п	Широта, град	Долгота, град	Время, мм:дд:чч (UT)	Скорость ветра, узел	Стадия троп. циклона
1	16.3	147.70	11:09:06	15	ТД
2	17.0	146.00	11:09:12	20	ТД
3	17.5	144.60	11:09:18	20	ТД
4	18.0	143.40	11:10:00	20	ТД
5	18.5	142.20	11:10:06	20	ТД
6	18.9	141.40	11:10:12	20	ТД
7	19.4	140.60	11:10:18	25	ТД
8	19.7	140.20	11:11:00	25	ТД
9	20.0	139.90	11:11:06	30	ТД
10	20.4	139.90	11:11:12	30	ТД
11	21.2	140.60	11:11:18	35	ТШ
12	22.2	142.00	11:12:00	35	ТШ
13	23.2	143.60	11:12:06	35	ТШ
14	24.1	146.00	11:12:12	35	ТШ
15	26.4	149.70	11:12:18	25	ТД

превышала значения этого параметра, полученного во второй серии в 12:57 LT в широтном диапазоне от 47° N до 54° N с максимумом на широте 48° N. В серии за 12:57 LT выделяются три отчетливых максимума на широтах 45, 50 и 53° N. Примечателен факт еще одного большого максимума в районе 36° N – что, скорее всего, является подтверждением распространения возмущения с юга. А ведь 11 ноября ТЦ в стадии депрессии практически подошел с запада к меридиану зоны

съемок и находился на 25–30° южнее. Еще раз стоит напомнить, что наблюдения велись на одном меридиане, т.е. мы наблюдаем “чистую” широтную зависимость, которая выражается в виде разнопериодных колебаний параметра $foF2$. В таком “меридиональном разрезе” возмущения, распространяющиеся с севера на юг (или наоборот), заданного параметра мы можем ожидать в виде расхождений между кривыми одной съемки,

**Рис. 4.** То же, что на рис. 3, для $foF2$, измеренной 7 ноября 2007 г.**Рис. 5.** То же, что на рис. 3, для $foF2$, измеренной 8 ноября 2007 г.

когда коэффициент корреляции близок к единице (как, например, 8 ноября 2007 г. (см. рис.5)).

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рисунках 3–6 видно, что измеренные значения параметра $foF2$, соответствующие определенной съемке, ниже значений, рассчитанных по модели для той же съемки.

Как было отмечено выше, наиболее интересными являются результаты, полученные 5 и 11 ноября. Согласно табл. 3, тропический циклон 5 ноября находился в стадии тропического шторма, но менее чем за сутки до съемки – в стадии ТЦ-1 (около 121° E). Также следует учесть, что данный ТЦ зародился на долготе 133° E.

Необходимо отметить, что ТЦ не является точечно-мгновенным возмущением, его можно считать “протяженным” и длительным возмущением. Ионосферный отклик разумно искать в зоне над действующим ТЦ. Эту зону мы условно назовем “широкополосной”. Локализация этой зоны (скажем, на $10\text{--}20^\circ$ западнее или восточнее от места нахождения ТЦ) зависит от направления распространения возмущения.

Мы полагаем, что занижение значений параметра $foF2$ полученного экспериментально, по сравнению с модельными (*IRI-2007*) значениями, не является случайным. На рисунке 3 представлено, что в 13:50 LT 5 ноября критическая частота слоя $F2$ была меньше предполагаемой ~ в 1.35 раза. В работе [Shan, 2008] было показано, что спустя сутки над зоной прохождения ТЦ наблюдалось падение N_e . А в работе [Ванина-Дарт и др., 2008] был впервые зарегистрирован экспериментальный факт понижения N_e в области D на расстоянии около 1000 км (по горизонтали) от ядра тропического циклона, действующего в активной фазе.

Помимо факта понижения значений параметра $foF2$, мы также наблюдали повышение значений $foF2$ (широтное “вздутие”) 11 ноября 2007 г. в 11:45 LT от 45 до 55° N и очень неравномерный ход в 12:57 LT (рис. 6). В этот день тропический циклон находился в стадии тропической депрессии (см. табл. 4) на долготе 140° E (а зародился на 147° E). Иными словами, по долготе ТЦ подошел достаточно близко к наблюдательным пунктам над о-вом Сахалин. Эти результаты также согласуются с работами авторов [Tian et al., 2009]. Авторы работы [Tian et al., 2009] считают, что понижение или повышение полного электронного содержания (ПЭС) в ионосфере зависит от положения ТЦ с точки зрения его “приземления” (пересечения суши в горизонтальной проекции по отношению к поверхности Земли). Их основной вывод заключается в следующем: до “приземления” тайфуна значение ПЭС выше ежемесячного соответствующего медианного значения, но после

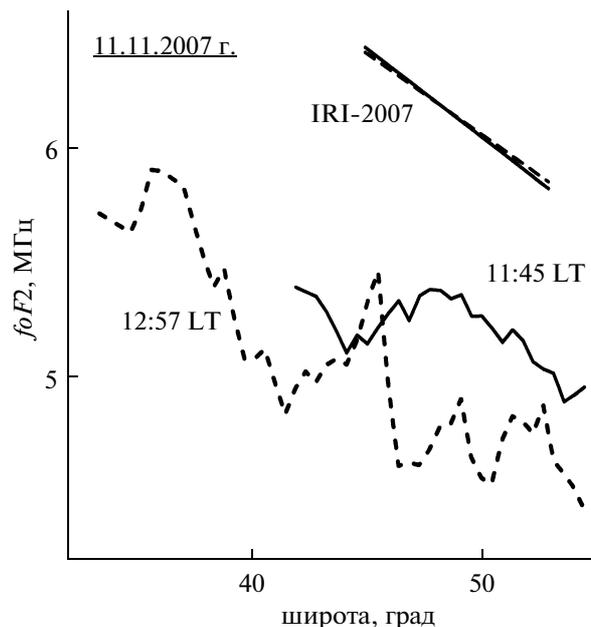


Рис. 6. То же, что на рис. 3, для $foF2$, измеренной 11 ноября 2007 г.

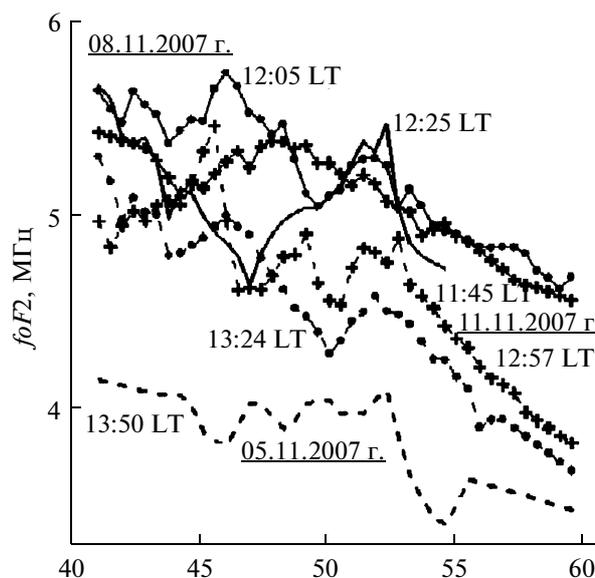


Рис. 7. Сравнение широтных зависимостей критической частоты $foF2$, измеренной 5, 8, 11 ноября 2007 г. над о-вом Сахалин.

“приземления” ТЦ становится значительно ниже, достигая минимума через сутки. Наблюдения рассматривались строго над зоной самого ТЦ.

В нашем случае 5 ноября тропический циклон действительно пересекал материк за сутки до регистрации ионосферных параметров, но это было на 20° западнее от места съемок. Связывать понижение электронной концентрации с “приземлением” ТЦ нам бы казалось слишком преждевременным. Скорее всего, механизм воздействия ТЦ

на ионосферу намного сложнее и является результатом суммарного воздействия волн различной природы от источника возмущения различных периодов (от часов и даже до нескольких суток!) на протяжении нескольких суток.

5. ВЫВОДЫ

На основе приведенного выше анализа данных, полученных методом фазоразностной томографии в первой половине ноября 2007 г. на о-ве Сахалин, авторы настоящей работы приходят к следующему выводу. Возможным откликом верхней ионосферы, локализующейся над зоной тропического циклона (в данном случае на 25–30° севернее и 5–20° восточнее) на расстоянии ~ от 3800 до 5500 км, является изменение ее параметра $foF2$ в среднем не более чем на 10–20%. Тем не менее, это является значительным откликом на таких расстояниях от источника возмущения. Уменьшение или, наоборот, повышение $foF2$ связано с “задержкой” момента измерений по отношению к началу действия ТЦ.

Мы полагаем, что сложности с нахождением отклика тропического циклона в ионосфере (и очень непростой морфологией) связаны с тем, что ТЦ является “широкополосным” источником возмущений, действующим в течение длительного времени. То есть, если полагать, что источником переноса возмущения снизу являются ВГВ, то мы имеем результат их суммарного воздействия.

Более серьезное обсуждение гипотетических механизмов воздействия ТЦ на ионосферу предполагается сделать в следующей работе, где будут представлены оставшиеся серии съемок, проведенные за 2007 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреева Е.С., Куницын В.Е., Терещенко Е.Д. Фазоразностная радиотомография ионосферы // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 32. № 1. С. 104–110. 1992.
- Афраймович Э.Л., Воейков С.В., Ишин А.Б., Перевалова Н.П., Ружин Ю.Я. Вариации полного электронного содержания во время мощного тайфуна 5–11 августа 2006 г. у юго-восточного побережья Китая // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 48. № 5. С. 703–708. 2008.
- Ванина-Дарт Л.Б., Покровская И.В., Шарков Е.А. Реакция нижней экваториальной ионосферы на сильные тропосферные возмущения // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 48. № 2. С. 255–260. 2008.
- Ванина-Дарт Л.Б., Покровская И.В., Шарков Е.А. Исследование взаимодействия нижней экваториальной ионосферы с тропическими циклонами по данным дистанционного и ракетного зондирования // Исследования Земли из космоса. № 2. С. 19–27. 2007.
- Ванина-Дарт Л.Б., Покровская И.В., Шарков Е.А. Влияние солнечной активности на отклик экваториальной нижней ионосферы во время активной фазы тропических циклонов // Исследования Земли из космоса. № 6. С. 3–10. 2007.
- Гохберг М.Б., Пилипенко В.А., Похотелов О.А. О сейсмических предвестниках в ионосфере // Физика Земли. Т. 10. С. 17–21. 1983.
- Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С. Радиотомография ионосферы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007.
- Липеровский В.А., Похотелов О.А., Шалимов С.Л. Ионосферные предвестники землетрясений. М.: Наука, 304 с. 1992.
- Михайлов Ю.М., Михайлова Г.А., Капустина О.В., Дружин Г.И., Чернева Н.В. Возможные атмосферные эффекты в нижней ионосфере по наблюдениям атмосферных радиозумов на Камчатке во время тропических циклонов // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 45. № 6. С. 824–839. 2005.
- Пулинец С.А., Боярчук К.А., Ломоносов А.М., Хегай В.В., Лю Й.Я. Ионосферные предвестники землетрясений: предварительный анализ данных критических частот $foF2$ наземной станции вертикального зондирования ионосферы Чунг-Ли (о. Тайвань) // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 42. № 4. С. 435–447. 2002.
- Пулинец С.А., Легенька А.Д., Зеленова Т.И. Зависимость сейсмо-ионосферных вариаций в максимуме слоя F от местного времени // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 38. С. 178–183. 1998.
- Романов А.А., Трусов С.В., Романов А.А., Крючков В.Г. Исследование ионосферных неоднородностей методом фазоразностной томографии в дальневосточном регионе России // Исследования Земли из космоса. № 2. С. 14–20. 2008.
- Смирнов В.М. Вариации ионосферы в период землетрясений по данным навигационных систем // Электронный журнал “Исследовано в России”. № 153. С. 1759–1767. 2001.
- Урличич Ю.М., Романов А.А., Романов А.А., Трусов С.В. Современные подходы к созданию автоматизированной системы регистрации ионосферных предвестников землетрясений по спутниковым данным // Космонавтика и ракетостроение. № 1. С. 167–172. 2006.
- Bauer S.J. A possible troposphere-ionosphere relationship // J. Geophys. Res. V. 62. № 3. 425 p. 1957.
- Bauer S.J. An apparent ionospheric response to the passage of hurricanes // J. Geophys. Res. V. 63. № 2. P. 265–269. 1958.
- Mikhailova G.A., Mikhailov Yu.M., Kapustina O.V. Variations of ULF-VLF electric fields in the external ionosphere over powerful typhoons in Pacific Ocean // Adv. Space Res. V. 30. № 11. P. 2613–2618. 2002.
- Pulinets S.A., Boyarchuk K.A. Ionospheric Precursors of Earthquakes. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag. 273 p. 2004.
- Shen C.S. The correlations between the typhoon and the $foF2$ of ionosphere // Chin. J. Space Sci. V. 2. № 4. P. 335–340. 1982.
- Tian M., JingSong W., GuangLin Y., Tao Y., JinSong P., YuCheng S. Effects of typhoon Matsa on ionospheric TEC // Chinese Sci. Bulletin, V. 55. № 8. P. 712–717. 2009.