

Влияние тропического циклона на верхнюю ионосферу по данным томографического зондирования над о. Сахалин

Л.Б. Ванина-Дарт¹, А.А.Романов², Е. А. Шарков¹

¹*Институт космических исследований РАН,
117997 Москва, Профсоюзная 84/32*

*E-mails: vandart@iki.rssi.ru,
easharkov@iki.rssi.ru;*

²*ФГУП "Российский научно-исследовательский институт
космического приборостроения",
111250, Москва, ул. Авиамоторная,
E-mail: romulas@rniikp.ru*

В работе рассмотрены данные томографического зондирования за ноябрь 2007 г., которое проводилось над 3 пунктами: Южносахалинск ($46^{\circ} 57' 0''$ N, $142^{\circ} 44' 0''$ E), Поронайск ($49^{\circ} 13' 0''$ N, $143^{\circ} 6' 0''$ E) и Ноглики ($51^{\circ} 49' 0''$ N, $143^{\circ} 7' 0''$ E) в целях поиска возможного влияния тропического циклона ТЦ на верхнюю ионосферу. Полученные результаты свидетельствуют о том, что после нескольких суток наблюдается понижение значений критической частоты слоя F2 на расстоянии около 3000 км от очага возмущения в горизонтальной проекции в долготном направлении. Также вблизи зоны действия ТЦ (в долготном направлении) и на протяжении 1-2 суток наблюдается повышение значений foF2. Сложности морфологического анализа данного явления заключаются в том, что ТЦ является «широкополосным» (в долготном направлении, в намного меньшей степени в горизонтальном направлении) и долговременным источником возмущения.

Ключевые слова: взаимодействие слоев, ионосфера, тропический циклон, томографическое зондирование, критическая частота слоя F2

Введение

Атмосферно-ионосферное взаимодействие является одним из самых интересных и перспективных прикладных направлений в геофизике. Ионосфера Земли моментально реагирует на изменения как со стороны падающего на нее излучения, так и со стороны состава нейтральной атмосферы. Отклонения в поведении ионосферных параметров обнаруживаются вследствие как литосферно-магнитосферных (землетрясения, вулканы), так и атмосферных явлений (грозы, циклоны, шквалы, ураганы и т.д.). А в последнее время много внимания уделяется очень важному тропосферному явлению, как тропический циклон. Точки зрения о возможном влиянии этого явления на ионосферу расходятся. Если в одних работах авторы находят возможный отклик тропических циклонов в нижней [1-4], верхней [5-7] или даже во внешней ионосфере [8], то, например, в работе [9] результат отрицателен.

В данной работе авторы попытались продолжить поиск возможного ионосферного отклика ТЦ, но уже в верхней ионосфере (предыдущие работы были посвящены поиску в области D). Данные, используемые в данной 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 незначительный вклад в фазу, и более существенный – в ее производную (см. п.1.1.).

Итак, целью данной работы является поиск возможного влияния ТЦ на верхнюю ионосферу на основе томографических данных, полученных в над о.Сахалин за 2007 г. Наблюдения проводилось над 3 пунктами: Южносахалинск (географические координаты: $46^{\circ} 57' 0''$ N, $142^{\circ} 44' 0''$ E), Поронайск ($49^{\circ} 13' 0''$ N, $143^{\circ} 6' 0''$ E) и Ноглики ($51^{\circ} 49' 0''$ N, $143^{\circ} 7' 0''$ E).

1. База данных и метод получения экспериментальных результатов

1.1. Описание метода

Теоретической основой лучевой РТ-радиотомографии являются известные соотношения [10-11] для фаз и амплитуд радиоволн в приближении геометрической оптики.

Следующая пара равенств определяет линейные интегралы от распределений электронной концентрации N_e и эффективной частоты соударений v :

$$\phi = \lambda r_e \int N_e d\sigma, \quad \chi = -\frac{\lambda r_e}{\omega} \int N_e v d\sigma \quad (1)$$

где λ – длина зондирующей волны, r_e – классический радиус электрона, $w=kc$, 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 $\chi = \ln(A/A_0)$ измеряемого поля ($E = A_0 \exp(i\Phi)$) и поля зондирующей волны ($E = A_0 \exp(i\Phi_0)$).

В процессе исследований измеряется линейный интеграл вида (1), умноженный на константу порядка единицы [10], 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 длинлуча в ионосфере порядка тысячи километров ϕ составляет тысячи радиан.

Отсюда возникает проблема выделения начальной фазы, остающейся постоянной в течение сеанса радиопросвечивания $\phi_0 = 2\pi n$, которую прибавить к измеряемой (в пределах 2π) $\Delta\phi$ и получить абсолютную (полную) $\phi = \phi_0 + \Delta\phi$ или линейный интеграл (1) [10-11].

Для решения проблемы неизвестной начальной фазы авторами [10-11] был предложен метод фазоразностной томографии, суть которого состоит в использовании 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 концентрации максимума [10-11]. Таким образом, метод фазоразностной томографии является наиболее точным и эффективным для реконструкции распределения электронной концентрации в ионосфере [10-12].

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

Оценку разрешающей способности метода фазоразностной томографии ионосферы без учета эффектов рефракции зондирующих сигналов можно провести, в соответствии с [11], из рассмотрения модельной задачи распространения в параболическом по высоте слое ионосферы:

$$N_{e_\theta} = N_{e_m} \left(1 - \frac{(h-h_m)^2}{y_m^2} \right) \quad (2)$$

где y_m – полутолщина слоя, а h_m и N_m – высота и максимум электронной концентрации слоя ионосферы.

В соответствии с решением лучевых уравнений [11] величина смещения траектории Δt и отклонения траектории Δh от прямолинейной с углом θ_0 к вертикали:

$$\Delta t \cong \frac{y_m \operatorname{tg} \theta_0}{3 \cos^2 \theta_0} \left(\frac{f_0}{f} \right)^2, \Delta h \cong \frac{y_m}{3 \cos^2 \theta_0} \left(\frac{f_0}{f} \right)^2, \quad (3)$$

Где $f_0 = \sqrt{(r_e N e_m c^2) / (3 \cos^2 \theta_0)}$ – критическая частота заданного параболического слоя, f – частота зондирования. Из (1.6) при $f_0 = 5-10$ МГц, $f = 150$ МГц, $y_m = 150$ км,

$0 \leq \theta_0 \leq 80^\circ$, $\Delta t \approx 5-25$ км, тогда как $\Delta h \approx 1-5$ км.

В соответствии с приведенными выше оценками и соотношениями (3), использование метода ионосферной томографии на базе сигналов низкоорбитальных навигационных систем можно восстановить вертикальное распределение Ne вдоль трассы пролета спутника с разрешением не менее $\Delta\tau \times \Delta h = 20-10$ км. Следовательно, появляется возможность выявления вариации Ne ионосферы, вызванных распространением сильных циклонов в тропосфере Земли, чего принципиально нельзя достигнуть только с использованием глобальных спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС и GPS.

1.2. Результаты численного моделирования реконструкции распределения электронной концентрации в ионосфере

Для оценки качества тематической обработки данных радиопросвечивания с использованием предложенной методики [13], были проведены реконструкции модельного распределения электронной концентрации в ионосфере с помощью разработанного программно-математического комплекса [12] для условий, идентичных реальной геометрии эксперимента, описанной в работах [12-13].

Ошибки реконструкции оценивались путем расчета невязки между исходной и восстановленной функциями и определялись следующими соотношениями [11]:

$$\delta_2 = \frac{\sqrt{\sum_i (F_i - \tilde{F}_i)^2}}{\sqrt{\sum_i F_i^2}}; \quad \delta_m = \frac{\max_i |F_i - \tilde{F}_i|}{\max_i |F_i|}, \text{ где } F - \text{значение исходной и } \tilde{F} - \text{значение восстановленной функции.}$$

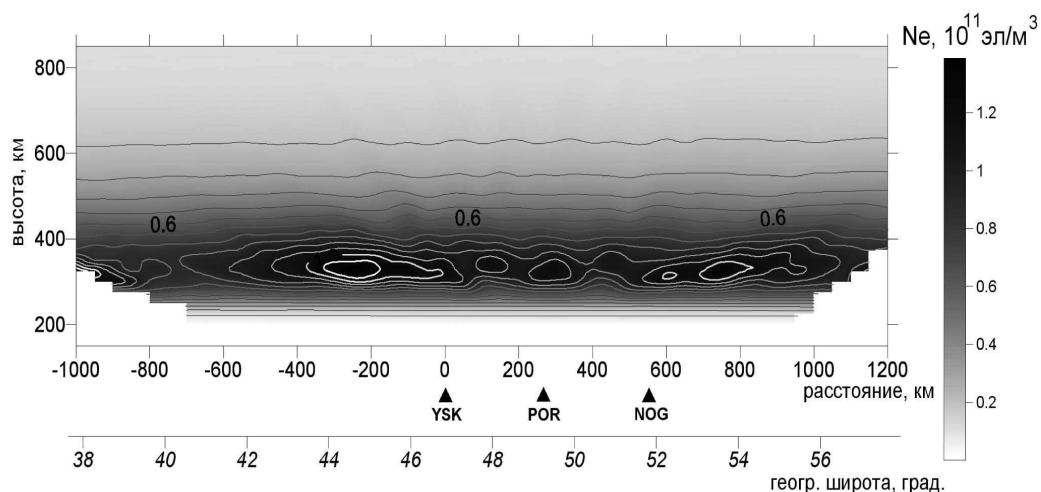
Результаты исследования показали, что при реконструкции модельного распределения, описывающего возмущенное состояние ионосферы (наличие неоднородностей и горизонтального градиента электронной концентрации) ошибки восстановления значений электронной концентрации характеризуются величинами $\delta_2 =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

1.3. Результаты экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования качества работы разработанной системы сбора и обработки данных радиопросвечивания ионосферы проводились с использованием сети приемных установок расположенных на о. Сахалин [12-13].

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. Хоккайдо, в 150 км к югу от томографической цепочки, с данными, полученными в результате работы программно-математического комплекса.



*Рис. 1. Распределение электронной концентрации 29.07.2007 0:30
(время местное) в районе о. Сахалин*

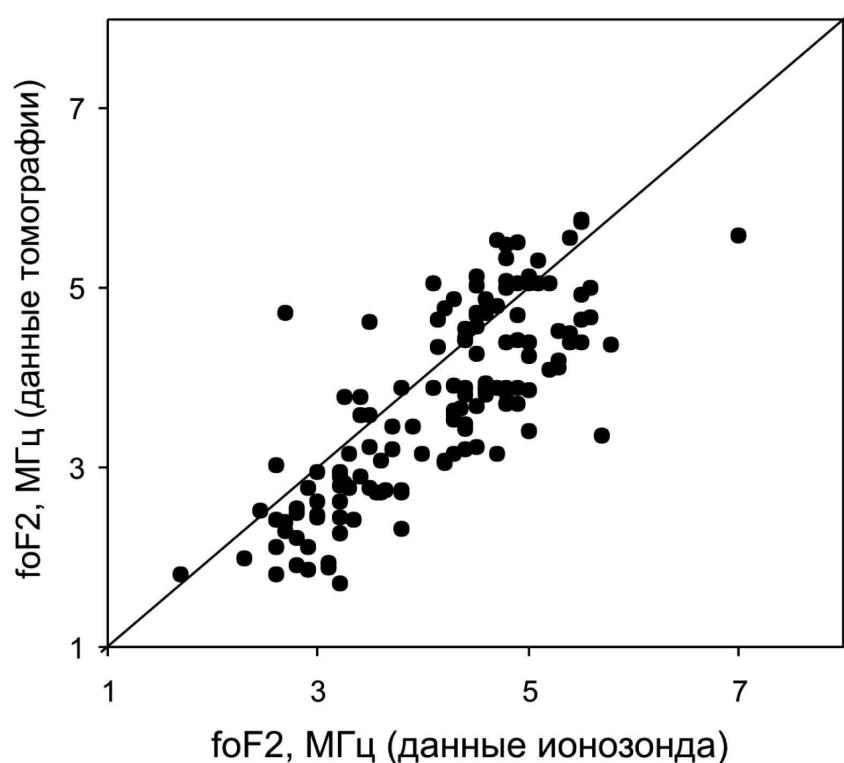


Рис. 2. Сопоставление значений критической частоты (foF2), полученных в результате томографии ионосферы с данными ионозонда Вакканай

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 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 ($\delta_2 = 0.9-0.11$) [11].

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

Анализ ионосферных данных является многопараметрической задачей. Электронная концентрация в области F2 зависит от: зенитного угла Солнца (время суток), сезона, гелиогеомагнитной обстановки и др. параметров. А, учитывая положение о.Сахалин, мы должны иметь информацию о сейсмической активности. В последние десятилетия уделялось много внимания взаимодействию слоев литосфера-атмосфера-ионосфера и было доказано, что процессы в литосфере оказывают электродинамическое воздействие на ионосферу. Так, например, в работах [14-17] перечислены основные характеристики ионосферных предвестников сильных землетрясений:

- Ионосферные предвестники представляют собой вариации плотности ионосферной плазмы (отклонения от невозмущенного значения), наблюдаемые за 1-5 суток.
- Длительность вариации одного знака невелика и составляет 4-6 часов. Только в случае очень сильных землетрясений она может быть значительной ~ 12 ч.
- В среднем сейсмоионосферные вариации имеют ту же амплитуду, что и ежедневная изменчивость ионосферы (15%-25%), но в определенные моменты местного времени они могут превышать 100%.
- Знак и форма сейсмоионосферных вариаций зависят от местного времени. По всей видимости, эти зависимости различны для разных регионов планеты и требуют дополнительного исследования в каждом конкретном случае.
- Размер модифицированной области ионосферы на высоте максимума слоя F2 зависит от магнитуды землетрясения.

- Положение максимума модифицированной области в ионосфере не совпадает с вертикальной проекцией эпицентра будущего землетрясения.

Полученные в работе [18] результаты, показывают, что в эпицентральной области за 3-5 суток наблюдается рост электронной концентрации в максимуме слоя F2 с дальнейшим ее уменьшением за 1-3 суток. При этом накануне землетрясения (за 1-2 суток), происходит нарушение пространственно-временного хода максимума электронной концентрации.

Поскольку авторам данной работы пока не представляется возможным выделение предполагаемого влияния ТЦ на ионосферу на фоне влияния землетрясений, было решено отбросить данные с наличием сейсмособытий. После этого обработке были подвергнуты только 4 серии съемок. В таблице 1 представлена информация о гелиогеомагнитной обстановке для этих серий томографического зондирования. В таблице для каждой съемки представлены: индекс солнечной активности $F_{10.7}$, 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 области F2 можно пренебречь.

Таблица1. Гелиогеомагнитная обстановка на время проведения томографического зондирования

Дата измерения Ne , дд.мм.гг	Время измерения Ne , UT	$F_{10.7}$, с.е.п.	Dst, нТ	Kp
05.11.07	02.25	66	-2	1
	03.50		0	
07.11.07	21.17	67	2	0
	23.06		5	
08.11.07	02.05	68	8	0
	03.24		11	
11.11.07	01.45	68	-1	0
	02.57		-2	

Перед землетрясениями поведение области F2 меняется над очагом события (см.выше), в таблице 2 авторы приводят данные о тех землетрясениях, которые происходили в ближайшее время после проведения томографического зондирования. На сайте www.sakhmeteo.ru Сахалинской Гидрометеослужбой представлены сейсмические данные, которые используются в данной работе.

Таблица 2. Данные о землетрясениях, которые происходили в ближайшее время после проведения томографического зондирования

Дата измерения Ne , дд.мм	Данные о землетрясении			
	Дата, дд.мм	Широта, в град.	Долгота, в град.	Магнитуда
05.11	14.11	-22.6	72	7.5
07.11	14.11	-22.6	72	7.5
08.11	14.11	-22.6	72	7.5
11.11	14.11	-22.6	72	7.5

В таблице 3 представлены географическое положение, скорость ветра и стадия тропических циклонов, самых близких к о.Сахалин. Также в таблице представлено время проведения 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.

Таблица 3. Данные о ТЦ, которые находились вблизи от места и на дату (или около) проведения томографического зондирования

Дата Изме- рения Ne , дд.мм	Данные о ТЦ				
	Широта, в град.	Долгота, в град.	Время, мм/дд/чч	Скорость ветра, узел	Стадия ТЦ
05.11	16.80	122.5	11/04/12	33	T-1
07.11	18.00	116.2	11/07/06	33	T-1
08.11	16.80	114.1	11/08/00	21	TS
11.11	20.00	139.9	11/11/06	15	TD

Для анализа мы взяли данные за 5,7, 8 и 11 ноября. Все эти съемки были проведены в один сезон, с максимальным исключением влияния землетрясений. Также 5, 8 и 11 ноября можно пренебречь зависимостью Ne от положения Солнца – съемки проводились примерно в одно и тоже время по местному полуострову. Безусловно, сопоставлять результаты было бы корректнее в полночь, поскольку процесс дневной ионизации (в основном зависит от излучения Солнца в КВ –диапазоне) во много раз менее чувствительный к помехам со стороны других источников ионизации. Тем не менее были получены следующие морфологические результаты в диапазоне широт 45^0 - 53^0 (был выбран именно этот диапазон, поскольку он перекрывает все три съемки).

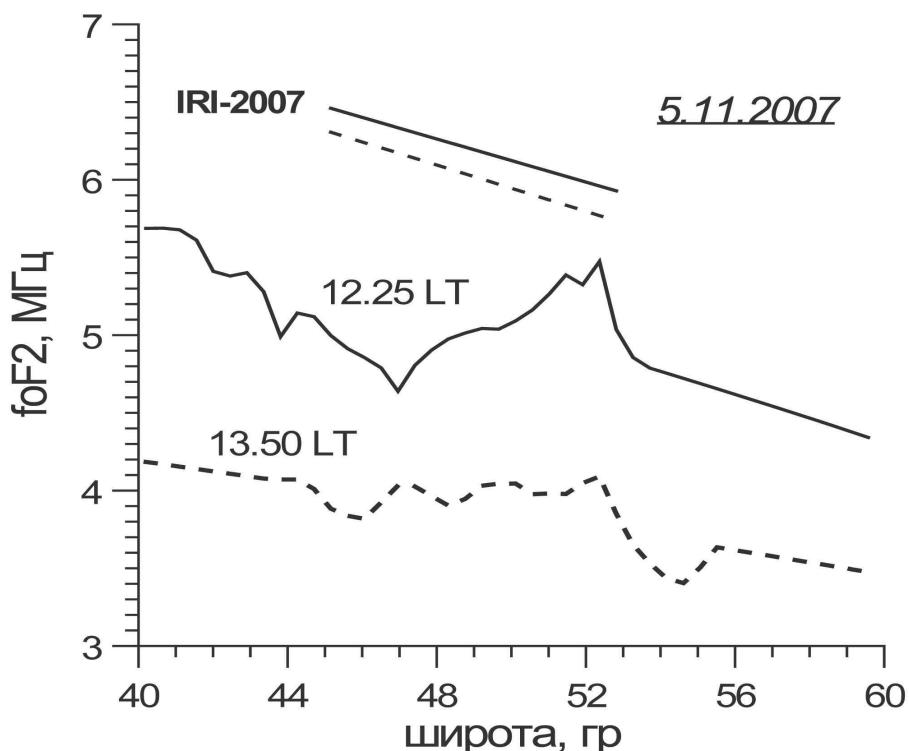


Рис.3. Широтная зависимость критической частоты $foF2$, измеренной 5 ноября 2007 г. над о.Сахалин

5 ноября съемка происходила с интервалом 1 час 25 мин (рис.3). В диапазоне широт 45^0 - 53^0 $foF2$ претерпевала изменения как в 12.25 LT, так и в 13.50 LT со средними значениями 5.04 и 3.98. Максимумы были зарегистрированы со значением 5.47 (в 12.25) и 4.09 (в 13.50). Коэффициент корреляции между измерениями 2 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 , шрих-линия – 13.50 LT). Модельные линии были рассчитаны с помощью международной ионосферной модели IRI-2007 (http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri_vitmo.html). Как видно из рисунка, расхождение между экспериментальными кривыми намного больше предполагаемого по модели, а сами значения электронной концентрации, полученные в эксперименте, меньше модельных.

7 ноября (рис.4) съемка происходила с интервалом 1 час 49 мин. В диапазоне широт 45^0 - 53^0 $foF2$ претерпевала изменения со средними значениями 2.90 и 4.03. Максимумы были зарегистрированы со значением 3.07 (в 07.17) и 4.35 (в 09.06). $R=0.16$ (количество измерений -17).

8 ноября съемка происходила с интервалом 1 час 19 мин. В диапазоне 45^0 - 53^0 Ne изменялась как в 12.05 LT, так и в 13.24 со средними значениями 5.33 и 4.63. Максимумы были зарегистрированы со значением 5.74 (в 12.05) и 5.0 (в 13.24). $R=0.94$ (количество измерений -18).

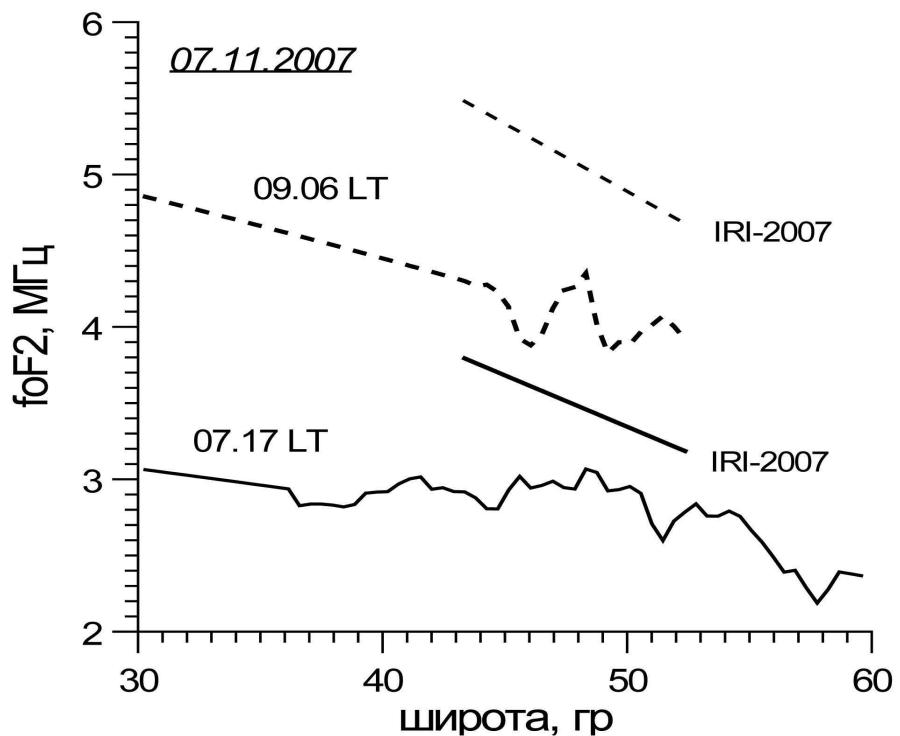


Рис. 4. Широтная зависимость критической частоты $foF2$, измеренной 7 ноября 2007 г. над о.Сахалин

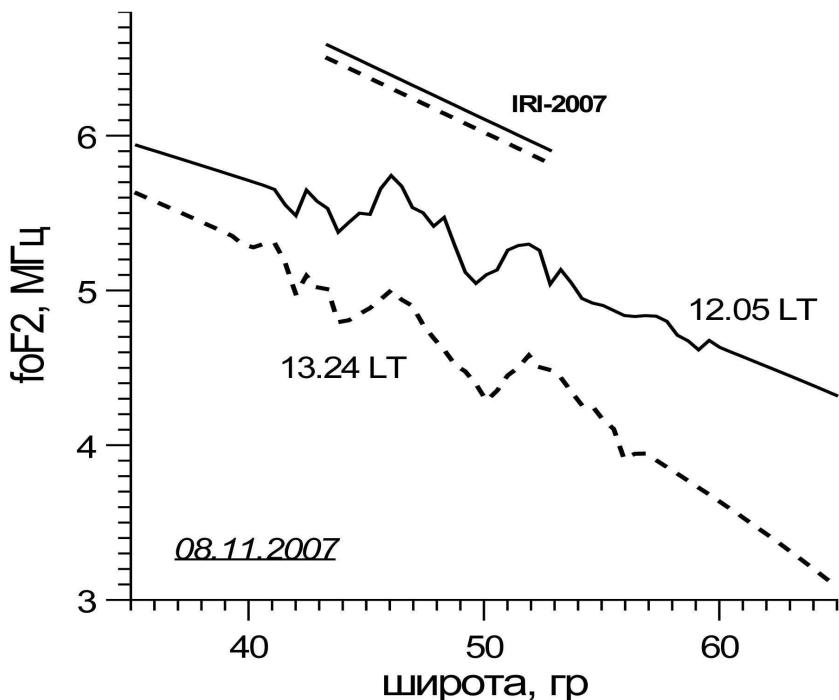


Рис.5. Широтная зависимость критической частоты $foF2$, измеренной 8 ноября 2007 г. над о.Сахалин

11 ноября (рис.6) съемка происходила и интервалом 1 час 12 мин. В диапазоне широт от 45-53 градусов f_{oF2} изменялась как в 11.45 LT, так и в 12.57 со средними значениями 5.25 и 4.81. Максимумы были зарегистрированы со значением 5.39 (в 11.45) и 5.46 (в 12.57). R=0.26 (количество измерений -18).

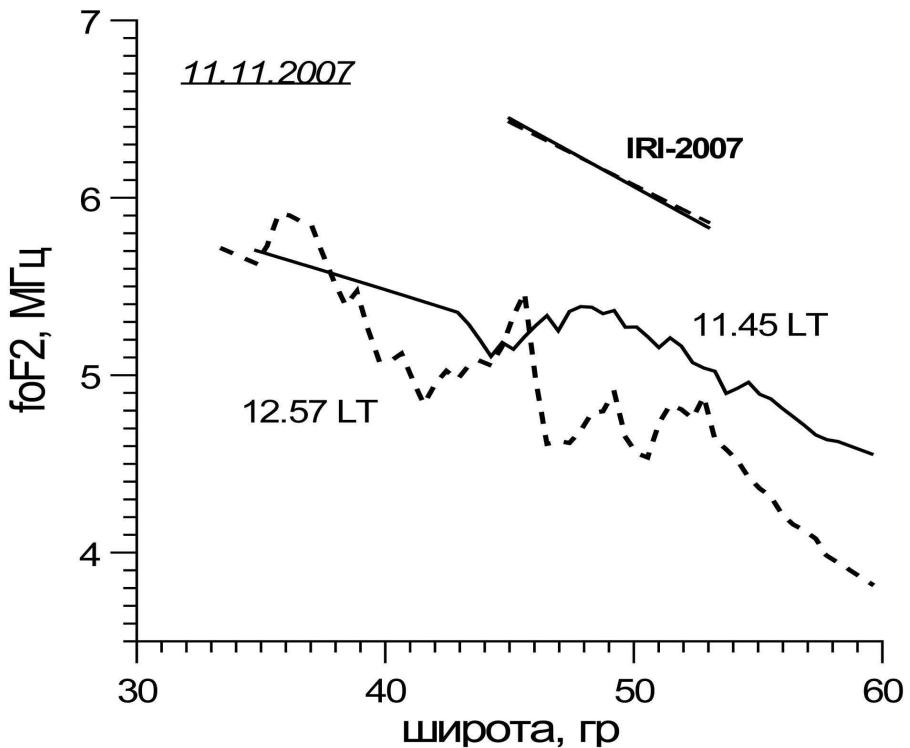


Рис.6. Широтная зависимость критической частоты f_{oF2} , измеренной 11 ноября 2007 г. над о.Сахалин

На рис.7 представлены зависимости параметра f_{oF2} (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 (где-то в 1.5раза меньше по значению). Это является интересным фактом, поскольку уже были работы, в которых отмечалось понижение параметра f_{oF2} , отождествлявшееся с влиянием тропического циклона. Отметим, что 5 ноября ТЦ в 1 стадии локализовался приблизительно на 30 градусов южнее и 20 градусов западнее от места получения экспериментальных данных в горизонтальной проекции над о.Сахалин. Также стоит отметить, что практически за полуторачасовой интервал съемок критическая частота слоя F2 достигла максимального различия в районе $51,5^{\circ}$ с.ш. со значением в 1,35 раза и минимального в районе 47° с.ш. со значением в 1,15. На рис.6 и 7 также является интересным факт явного возмущения («вздутия»), зафиксированного 11 ноября. Съемка, как отмечалось выше, проходила с интервалом чуть более 1 часа. При этом в 11.45 LT критическая частота несколько (не более, чем на 10

процентов) превышала предполагаемые модельные значения от 47^0 до 54^0 градусов с.ш. с максимумом на широте 48^0 , зато в 12.57 LT-выделяются 3 отчетливых максимума на широте 45^0 , 50^0 и 53^0 . И также является примечательным факт еще одного большого максимума в районе 36^0 . – что, скорее всего, является фактом распространения возмущения с запада. А ведь 11 ноября тропический циклон в стадии депрессии практически подошел с запада к зоне съемок и находился на 25^0 - 30^0 южнее.

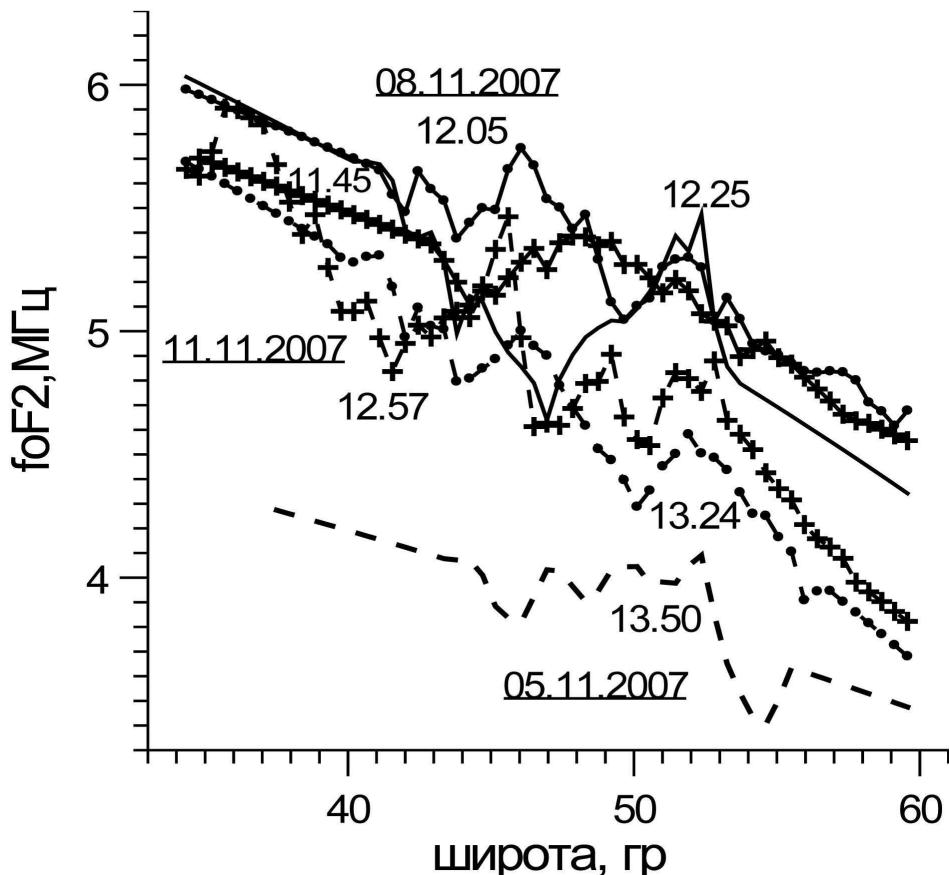


Рис.7. Сравнение широтных зависимостей критической частоты f_{oF2} , измеренной 5,8,11 ноября 2007 г. над о.Сахалин.

Обсуждение результатов

На всех представленных рисунках 3-6 видно, что значения экспериментальных данных ниже модельных значений. И это связано со систематической ошибкой метода.

Как было отмечено выше, наиболее интересными являются результаты, полученные 5 и 11 ноября. Согласно табл. 4 и 5 ноября ТЦ находился в стадии тропического шторма, но менее, чем за сутки – в стадии ТЦ-1 (около 121^0 E.). Также следует учесть, что данный ТЦ зарождался на долготе 133^0 E.

Таблица 4. Данные о прохождении тропического циклона 1-10 ноября 2007 г.
над акваторией Западного Тихого океана

N	широта, град.	долгота, град.	время наблюдения дд/мм/чч(UT)	скорость ветра, узел	давление, мбар	стадия ТЦ
1	17.70	132.90	11/01/18Z	15	1010	ТД
2	18.00	132.60	11/02/00Z	15	1010	ТД
3	18.30	132.30	11/02/06Z	20	1007	ТД
4	18.50	131.40	11/02/12Z	15	1006	ТД
5	18.80	130.50	11/02/18Z	20	1007	ТД
6	18.40	129.60	11/03/00Z	20	1003	ТД
7	18.20	128.50	11/03/06Z	25	1004	ТД
8	18.10	127.20	11/03/12Z	35	1000	ТШ
9	17.50	126.10	11/03/18Z	45	998	ТШ
10	17.00	124.90	11/04/00Z	50	985	ТШ
11	16.80	123.60	11/04/06Z	60	978	ТШ
12	16.80	122.50	11/04/12Z	65	974	Т-1
13	17.20	120.90	11/04/18Z	65	974	Т-1
14	17.50	120.00	11/05/00Z	55	982	ТШ
15	17.60	119.60	11/05/06Z	55	982	ТШ
16	17.70	119.20	11/05/12Z	55	982	ТШ
17	18.00	118.80	11/05/18Z	60	978	ТШ
18	18.40	118.60	11/06/00Z	70	974	Т-1
19	18.60	118.40	11/06/06Z	75	967	Т-1
20	18.70	118.20	11/06/12Z	75	967	Т-1
21	18.50	117.70	11/06/18Z	75	967	Т-1
22	18.30	117.10	11/07/00Z	70	970	Т-1
23	18.00	116.20	11/07/06Z	65	974	Т-1
24	17.60	115.40	11/07/12Z	55	982	ТШ
25	17.30	114.70	11/07/18Z	50	985	ТШ
26	16.80	114.10	11/08/00Z	40	993	ТШ
27	16.30	113.40	11/08/06Z	35	996	ТШ
28	15.80	112.80	11/08/12Z	35	996	ТШ
29	14.80	112.20	11/08/18Z	35	996	ТШ
30	13.70	111.60	11/09/00Z	30	1000	ТД
31	12.60	111.40	11/09/06Z	25	1004	ТД
32	12.20	111.10	11/09/12Z	25	1004	ТД
33	11.80	110.30	11/09/18Z	25	1004	ТД
34	11.50	109.60	11/10/00Z	20	1007	ТД
35	11.50	108.50	11/10/06Z	20	1007	ТД

Примечания: ТД-тропическая депрессия, ТШ-тропический шторм, Т-1, 2 и т.д.-тропический циклон в стадии 1 и т.д.

Таблица 5. Данные о прохождении тропического циклона
9-12 ноября 2007г. над акваторией Западного Тихого океана

N	широта, град.	долгота, град.	время наблюдения дд/мм/чч(UT)	скорость ветра, узел	давление, мбар	стадия ТЦ
1	16.30	147.70	11/09/06Z	15	1010	ТД
2	17.00	146.00	11/09/12Z	20	1007	ТД
3	17.50	144.60	11/09/18Z	20	1007	ТД
4	18.00	143.40	11/10/00Z	20	1007	ТД
5	18.50	142.20	11/10/06Z	20	1004	ТД
6	18.90	141.40	11/10/12Z	20	1004	ТД
7	19.40	140.60	11/10/18Z	25	1004	ТД
8	19.70	140.20	11/11/00Z	25	1004	ТД
9	20.00	139.90	11/11/06Z	30	1000	ТД
10	20.40	139.90	11/11/12Z	30	1000	ТД
11	21.20	140.6	11/11/18Z	35	996	ТШ
12	22.20	142.00	11/12/00Z	35	996	ТШ
13	23.20	143.60	11/12/06Z	35	996	ТШ
14	24.10	146.00	11/12/12Z	35	996	ТШ
15	26.40	149.70	11/12/18Z	25	1004	ТД

Если брать ядерный взрыв за аналог ТЦ, то отклик в верхней ионосфере нужно искать в волноводе вблизи долготы очага возмущения [19]. Но ведь ТЦ не является точечно-мгновенным возмущением, его можно назвать «широкополосным» и долгим возмущением в долготном направлении (в широтном направлении в меньшей степени). За все время его действия ионосферный отклик разумно искать во всем «широкополосном» волноводе. А, учитывая его действие длительностью в несколько суток напрашивается вывод о том, что данный «широкополосный» волновод будет охватывать и окололежащие долготы. Но локализация этих долгот (скажем, на 10-20 градусов западнее или восточнее) будет зависеть от направления распространения возмущения.

Занижение значений (отбросив систематическую ошибку измерений) $foF2$, полученной экспериментально, является далеко неслучайным. На рис.3 представлено, что в 13.50 LT 5 ноября критическая частота слоя F2 была меньше предполагаемого приблизительно в 1.35 раза. В работе [7] было показано, что после суток над зоной прохождения тропического циклона электронная концентрация падает. Также в работе [2] наблюдалось понижение Ne где-то через сутки над зоной прохождения циклона около 1000 км.

Напротив, мы имеем повышение значений $foF2$ (широтное «воздутие») в 11.45 LT от 45^0 до 55^0 N и очень неравномерный ход в 12.57 LT (рис. 6). 11 ноября тропический ци-

клон находился в стадии тропической депрессии на долготе 140° Е (а зарождался на 147° Е). Т.е. по долготе ТЦ подошел достаточно близко к наблюдательным пунктам над о.Сахалин. Эти результаты также согласуются с работами авторов [Tian et al., 2009]. Хотя авторы работы [Tian et al., 2009] считают, что понижение или повышение ПЭС -полного электронного содержания в ионосфере зависит от положения тропического циклона с точки зрения его пересечения берега суши в горизонтальной проекции по отношению к Земле. Их основной вывод заключается в следующем: до «приземления» тайфуна значение полного электронного содержания выше ежемесячного медианного значения ПЭС, но после «приземления» ТЦ становится значительно ниже, достигая минимума через сутки.

В нашей случае 5 ноября тропический циклон действительно пересекал материк за сутки до съемок ионосферных параметров, но это было на 20 градусов 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 суммой воздействия волн различной природы от источника возмущения различных периодов (от часов и даже до нескольких суток!) на протяжении нескольких суток.

Выходы

На основе приведенного выше анализа данных томографического зондирования, полученных в ноябре 2007 г. на о.Сахалин, можно сделать вывод, что возможным откликом верхней ионосферы, локализующейся над зоной тропического циклона (в данном случае на $25\text{-}30^{\circ}$ севернее и $5\text{-}20^{\circ}$ восточнее), является изменение ее параметра в среднем foF2 на $10\text{-}20$ процентов. 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 достаточно долгого временного периода. Приведенные результаты свидетельствуют о том, что источником переноса возмущения снизу являются скорее всего внутренние гравитационные волны, хотя мы не исключаем действие планетарных волн.

Литература

1. *Михайлов Ю.М., Михайлова Г.А., Капустина О.В., Дружин Г.И., Чернева Н.В.* Возможные атмосферные эффекты в нижней ионосфере по наблюдениям атмосферных радиошумов на Камчатке во время тропических циклонов// Геомагнетизм и аэрономия. 2005. Т. 45, N 6. С. 824-839
2. *Ванина-Дарт Л.Б., Покровская И.В., Шарков Е.А.* Реакция нижней экваториальной ионосферы на сильные тропосферные возмущения. Геомагнетизм и аэрономия. 2008. Т. 48. № 2. С. 255-260
3. *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. 2007. N2. С.19-27
4. *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, 2007. N 6. С. 3-10
5. *Bauer S.J., A possible troposphere-ionosphere relationship// J.Geophys.Res., 1957. V. 62, N 3, P. 425*
6. *Bauer S.J., An apparent ionospheric response to the passage of hurricanes// J.Geophys.Res., 1958. V. 63, N 2, P. 265-269*
7. *Shen C.S. The correlations between the typhoon and the offF2 of ionosphere // Chin. J. Space Sci. 1982. V. 2. № 4. P. 335–340.*
8. *G. A. Mikhailova , Yu. M. Mikhailov and O. V. Kapustina, Variations of ULF-VLF electric fields in the external ionosphere over powerful typhoons in Pacific Ocean// Advances in Space Research, 2002. V. 30, Is. 11, P. 2613-2618*
9. Э. Л. Афраймович, С. В. Войков, А. Б. Ишин, Н.П. Перевалова, Ю. Я. Ружин. Вариации полного электронного содержания во время мощного тайфуна 5–11 августа 2006 г. у юго-восточного побережья Китая// Геомагнетизм и аэрономия, 2008. Т.48, N 5. С. 703-708
10. *Андреева Е.С., Куницын В.Е., Терещенко Е.Д.* Фазоразностная радиотомография ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия, 1992. Т. 32, N 1. С.104-110
11. *Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С.* Радиотомография ионосферы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007
12. *A.A. Романов, С.В. Трусов, А.А. Романов, В.Г. Крючков* Исследование ионосферных неоднородностей методом фазоразностной томографии в дальневосточном регионе России// Исследование земли из космоса, 2008. №2. С. 14-20
13. *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, 2006. №1. с. 167-172

14. Гохберг М.Б., Пиличенко В.А., Похомелов О.А. О сейсмических предвестниках в ионосфере // Физика Земли, 1983. Т.1 0. С. 17-21
15. Липеровский В.А., Похомелов О.А., Шалимов С.Л. Ионосферные предвестники землетрясений // М.: Наука, 1992. 304 с.
16. Пулинец С.А., Боярчук К.А., Ломоносов А.М., Хегай В.В., Лью Й.Я. Ионосферные предвестники землетрясений: предварительный анализ данных критических частот foF2 наземной станции вертикального зондирования ионосферы Чунг-Ли (о. Тайвань). // Геомагнетизм и аэрономия, 2002. Т.42. №4. С.435-447
17. Пулинец С.А., Легенъка А.Д., Зеленова Т.И. Зависимость сейсмо-ионосферных вариаций в максимуме слоя F от местного времени // Геомагнетизм и аэрономия, 1998. Т.38. С.178-183
18. Смирнов В.М. Вариации ионосферы в период землетрясений по данным навигационных систем // Электронный журнал "Исследовано в России", 2001. № 153. С.1759-1767
19. Адушкин В.В., Горелый К.И. Ионосферные эффекты воздушных ядерных взрывов при разных уровнях геомагнитной активности // Геомагнетизм и аэрономия. 1995. Т. 35.№ 2.
20. M. Tian, W. JingSong, Y. GuangLin, Y. Tao, P. JinSong, S. YuCheng, Effects of typhoon Matsa on ionospheric TEC, 2009, Chinese Science Bulletin, doi: 10.1007/s11434-009-0472-0

Tropical cyclone influence on the higher ionosphere from tomography sounding data over Sakhalin island

L.B. Vanina-Dart¹, A.A. Romanov², E. A. Sharkov¹

¹*Space Research Institute RAN,
117997 Moscow, 84/32 Profsoyuznaya str.
E-mails: vandart@iki.rssi.ru,
easharkov@iki.rssi.ru;*

²*FGUP "The Russian scientific research institute of
Space instrument making ",
111250, Москва, ул. Авиамоторная,
E-mail: romulas@rniikp.ru*

In this paper tomography sounding data taken in November 2007 is considered for following 3 points: Uzhnosahalinsk ($46^{\circ} 57' 0''$ N, $142^{\circ} 44' 0''$ E), Poronajsk ($49^{\circ} 13' 0''$ N, $143^{\circ} 6' 0''$ E) and Nogliki ($51^{\circ} 49' 0''$ N, $143^{\circ} 7' 0''$ E). The aim of this research is to find the possible influence of tropical cyclone TC on the higher ionosphere. The results demonstrate that values for critical frequency of F2-layer (as measured at approximately 3000 km from the TC centre in a horizontal plane in a longitudinal direction) fall after several days. Also the foF2 values increased over 1 or 2 day period near the TC active zone (in a longitudinal direction). Complexities of the morphological analysis of the given phenomenon consist that ТЦ is «широкополосным» (in a longitudinal direction, in much smaller degree in a horizontal direction) and a long-term source of indignation. A major difficulty posed to our study is that the TC is wide-spread and long-lived.

Keywords: layers interaction, ionosphere, tropical cyclone, tomography sounding, critical frequency of F2-layer