

Вариации ионосферного слоя F2 под влиянием тропического циклона по данным радиозондирования

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

¹Учреждение Российской академии наук Институт
космических исследований РАН

117997, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32, vandart@iki.rssi.ru, easharkov@iki.rssi.ru

²ОАО «Российская корпорация ракетно-космического приборостроения
и информационных систем, (ОАО Российские космические системы),

111250, Москва, ул. Авиамоторная, 53, romulas@rniikp.ru

В работе рассмотрены данные томографического зондирования за 2007 г., которое проводилось над 3 пунктами, расположенными на одном меридиане: Южно-Сахалинск (47° N, 142° E), Поронайск (49°N, 143°E) и Ноглики (52° N, 143° E) в целях поиска возможного влияния тропического циклона (ТЦ) на верхнюю ионосферу. Использование метода фазоразностной томографии в ионосфере на базе сигналов низкоорбитальных спутниковых навигационных систем предположительно позволяет выявлять вариации электронной концентрации ионосферы, вызванные распространением сильных циклонов в тропосфере Земли, чего принципиально нельзя достигнуть только с использованием глобальных спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС и GPS. В дополнение к полученным ранее выводам на основе одной и той же базы данных (за первую половину ноября 2007 г.) полученные результаты свидетельствуют о том, что воздействие ТЦ на верхнюю ионосферу может влиять на изменения ее параметров до 40 %. Влияние предполагаемого источника возмущения в виде ТЦ на высотах слоя F2 начинает значительно падать на расстоянии около 4000-5000 км от него вдоль направления «восток-запад» или «запад-восток» по горизонтали. Вдоль направления «юг-север» в северном полушарии это влияние также «обрезается» широтой около 50° N (на расстоянии до 6500 км по горизонтали). Сложности морфологического анализа данного явления заключаются в том, что ТЦ является «широкополосным» и долговременным источником возмущения. Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект № 09-05-01019_a) и Программы фундаментальных исследований РАН «Радиоэлектронные методы в исследованиях природной среды и человека» (ОФН-13).

Ключевые слова: взаимодействие слоев, ионосфера, тропический циклон, томографическое зондирование, критическая частота слоя F2, ионосферная радиотомография, низкоорбитальные навигационные спутниковые системы.

Введение

Теоретическое и экспериментальное изучение верхней ионосферы до сих пор остается актуальным в международных программах геофизических и космических исследований. Знание параметров движений ионизованной составляющей ионосферной плазмы необходимо для построения моделей верхней атмосферы, уяснения физической природы взаимодействия различных атмосферных слоев, решения ряда прикладных задач (распространение радиоволн, ориентация космических аппаратов, радиоизмерения параметров их движения, повсеместное использование GPS навигаторов и т. п.). Сложность протекающих ионосферных процессов приводит к неоднозначности интерпретации результатов наблюдений. На это накладываается сильная изменчивость динамического режима. Проблема пока далека от полного решения.

Данная работа посвящена продолжению поиска предполагаемого влияния тропического циклона (ТЦ) на верхнюю ионосферу на основе томографических данных, полученных над о.Сахалин в 2007 г. (Ванина-Дарт и др., 2010). Наблюдение проводилось над

тремя пунктами, расположенными на одном меридиане: Южно-Сахалинск (47° N, 143° E), Поронайск (49° N, 143° E) и Ноглики (52° N, 143° E). В работе рассмотрены 12 серий наблюдений, измеренных во время действия ТЦ. В результате анализа ионосферных данных (переведенных в foF2 – критическую частоту слоя F2) были получены выводы о том, что в зависимости от положения и стадии ТЦ, значения параметров верхней ионосферы либо понижаются, либо увеличиваются. Но, в связи с указанной выше сложностью динамического режима атмосферы, нам пока не удастся точно определить механизм связи наблюдаемой корреляции между ТЦ и ионосферой. Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 09-05-01019-а).

База данных и метод получения экспериментальных результатов

Напомним, что в статье (Ванина-Дарт и др., 2010) уже были подробно рассмотрены база данных и метод получения данных. Кратко отметим, что в данной работе мы использовали данные, полученные методом фазоразностной томографии. 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. Таким образом, метод фазоразностной томографии является наиболее точным и эффективным для реконструкции распределения электронной концентрации в ионосфере (Андреева и др., 1992; Куницын и др., 2007; Романов и др., 2008) .

Анализ данных, полученных в 2007 г. над о. Сахалин

Электронная концентрация в области F2 зависит от многих параметров, таких как зенитный угол Солнца (время суток), сезон, гелиогеомагнитная обстановка и др. Учитывая положение о.Сахалин, мы должны иметь информацию о сейсмической активности в этом регионе. Ранее было доказано, что процессы в литосфере оказывают электродинамическое воздействие на ионосферу. Поскольку авторам данной работы пока не представляется возможным выделение предполагаемого влияния ТЦ на ионосферу на фоне влияния землетрясений, было решено отбросить данные, на которые сейсмособытия могли оказать влияние. После этого обработке были подвергнуты 12 серий съемок. 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 области F2 можно пренебречь.

Таблица 1. Гелиогеомагнитная обстановка на время проведения измерений

Дата измерения №, дд.мм.гг	Время измерения №, УТ, чч.мм	F10.7	Dst, нТл	Kp
14.05.2007	22.47	74	4	1
	23.36		6	
20.05.2007	22.07	76	-6	1
	22.43		-6	
06.07.2007	16.23	74	-9	2
	17.01		-9	
07.07.2007	16.52	76	-10	1
	17.27		-10	
29.08.2007	10.28	71	-1	1
	10.51		-2	
24.09.2007	07.01	67	-10	1
	08.14		-10	
05.11.2007	02.25	66	-2	1
	03.50		0	
07.11.2007	21.17	67	2	0
	23.06		5	
08.11.2007	02.05	68	8	0
	03.24		11	
11.11.2007	01.45	68	-1	0
	02.57		-2	
20.11.2007	00.46	68	21	2
	01.38		9	
23.11.2007	00.28	68	-47	3
	01.12		-42	

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

Дата измерения №, дд.мм.гг	Данные о землетрясении			
	Дата, дд.мм	Широта, в град.	Долгота, в град.	Магнитуда
14.05.2007	30.05	52.5	157	5.7
20.05.2007	30.05	52.5	157	5.7
06.07.2007	11.07	49	142	5
07.07.2007	11.07	49	142	5
29.08.2007	01.09	50.75	156.1	3
	03.09	45.7	151	5.9

В таблице 3 дана информация о географическом положении и стадии тропических циклонов, которые были самыми близкими 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 значимой для данной задачи.

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

Дата измерения №, дд.мм	Данные о ТЦ			
	Широта, в град.	Долгота, в град.	Время, мм/дд/чч	Стадия ТЦ
14.05	7.8	146.70	05/15/00	ТД
20.05	19.9	135.40	05/20/12	Т-4
06.07	21	108.2	07/05/06	ТШ
	4.2	148.3	07/06/18	ТД
07.07	5.9	147.7	07/07/18	ТД
29.08	21.10	156	08/29/00	ТШ
24.09	19.8	111.5	09/24/00	ТШ
05.11	16.80	122.5	11/04/12	Т-1
07.11	18.00	116.2	11/07/06	Т-1
08.11	16.80	114.1	11/08/00	ТШ
11.11	20.00	139.9	11/11/06	ТД
20.11	11.60	138.3	11/20/00	ТД
23.11	9.30	151.9	11/23/00	ТД

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

В предыдущей работе (Ванина-Дарт и др., 2010) мы рассмотрели данные, полученные в результате томографического зондирования, за 5, 7, 8 и 11 ноября (см. также http://d33.infospace.ru/d33_conf/sb2010t1/173-189.pdf). Изначально данные содержат высотное распределение электронной концентрации для определенного широтного интервала. Поскольку слой F2 является основным носителем полного электронного содержания, то логически был сделан вывод об использовании основного ионосферного параметра этого слоя – критической частоты $foF2$. Соответственно, данные об электронной концентрации были переведены в данные о критической частоте слоя F2. Отметим, что полученные данные сопоставлялись со значениями модельных кривых зависимости параметра $foF2$ от широты. Кривые были построены с использованием международной ионосферной модели IRI-2007 (http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri_vitmo.html). На основе приведенного в предыдущей работе анализа данных томографического зондирования, полученных в первой половине ноября 2007 г. на о.Сахалин, был сделан вывод о том, что возможным откликом верхней ионосферы, локализующейся над зоной тропического циклона (в данном случае на 25-300 севернее и 5-200 восточнее), является изменение ее параметра в среднем $foF2$ на 10-20 процентов. Уменьшение или, наоборот, повышение $foF2$ связано с «задержкой» момента измерений по отношению к началу действия ТЦ.

В настоящей работе анализировались данные, полученные в мае, июле, августе, сентябре и ноябре 2007 г. Измерения проводились в разное время суток – утром, днем и вечером. Но, поскольку влияние Солнца в таком случае возможно избежать с применением той же модели IRI-2007, будем сопоставлять значения-отклонения от модельных кривых. На рис. 1, 3, 4, 5, 8 кривые, полученные за 2 серии съемки, в основном параллельны друг другу. Это говорит о том, что изменения ионосферы происходили по направлению «запад-восток» (или, наоборот). Поскольку, для нас более содержательной будет информация в направлении «юг-север» (т.к. положение ТЦ является намного южнее пунктов измерений).

На рис. 1 представлена широтная зависимость параметра $foF2$, полученная во время съемки 14 мая в 8.47 LT и 9.36 LT (примечания к рис.1: сплошная линия соответствует первой серии съемки, а штриховая – второй; даты съемок представлены по Гринвичу). Как мы видим, расхождение между полученными значениями параметра $foF2$ в двух сериях превы-

шает модельное. На широтах 40-47° N формы кривых разные, далее же (по ходу увеличения широты) очень схожи. Это свидетельствует о том, что в районе 9-10 часов 14 мая на меридиане 143° E распространялось возмущение с юга (где-то до 47° N). Также присутствовало возмущение по направлению «запад-восток». По данным табл. 3 на широте 8° N и долготе 146° E зарождался ТЦ, что возможно и стало причиной зафиксированных (не очень значительных) отклонений в верхней ионосфере. В дальнейшем данный циклон, превратившийся в ТЦ с названием «Super Typhoon-4 YUTU» (см. <http://weather.unisys.com/hurricane/>) стал двигаться на север. На рис. 2, полученном по данным 20 мая в 8.07 и 8.43 LT, мы видим, что расхождение между полученными значениями параметра foF2 в двух сериях несколько превышает модельное. Но, скорее эти кривые можно охарактеризовать как «параллельный сдвиг». Это опять свидетельствует в пользу перемещения возмущения в направлении «юг-север». В табл. 3 ТЦ 20 мая был в стадии 4 и находился на широте около 20° N и долготе 135° E.

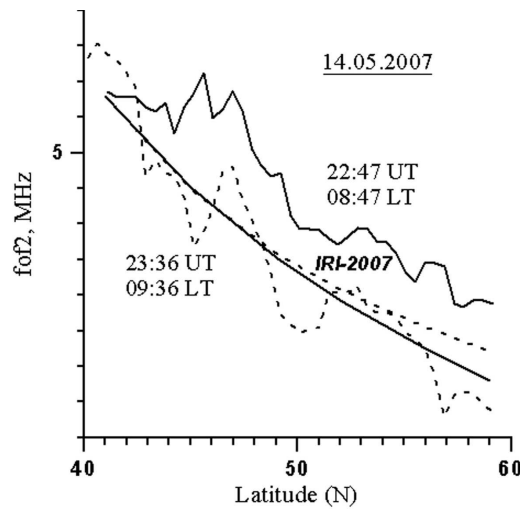


Рис. 1. Широтная зависимость критической частоты F2, измеренной 14 мая 2007 г. над о.Сахалин

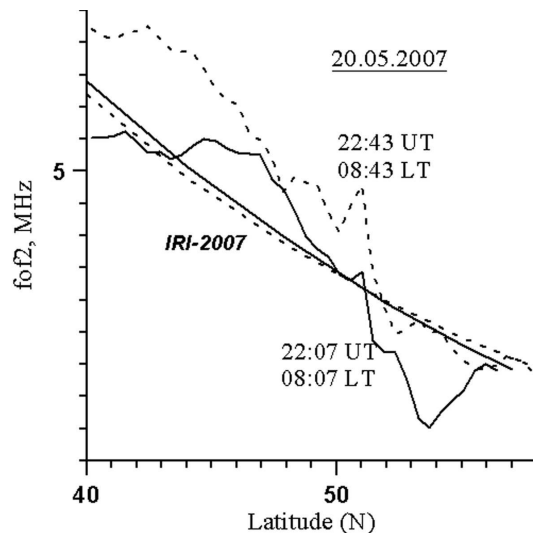


Рис. 2. Широтная зависимость критической частоты F2, измеренной 20 мая 2007 г. над о.Сахалин

Информация на рис.3-5 представлена по данным томографического зондирования от 6, 7 июля и 29 августа. Их объединяет факт съемки в период «терминатора», т.е. пересечения точки измерения границы «ночь-день» или «день-ночь», когда Солнце либо

восходит, либо заходит в данной точке. Отметкой «т» помечена широта «терминатора» для данных высоты и долготы измерений в соответствующее время. Как видно из рис.3-5, пики возмущений в верхней ионосфере, связанные с прохождением «терминатора», достигают увеличения приблизительно до 35 % от предполагаемой величины (7 июля в 03.27 LT). Но, следует отметить, что кривые являются более «изрезанными» 29 августа. Во-первых, они были получены в период захода (когда изменение значений электронной концентрации все-таки происходит более плавно по сравнению с условиями восхода). Во-вторых, ТЦ находился в это время в стадии тропического шторма ТШ, т.е. функционировал более длительное время перед съемками по сравнению с ТЦ, действовавшими 6 и 7 июля.

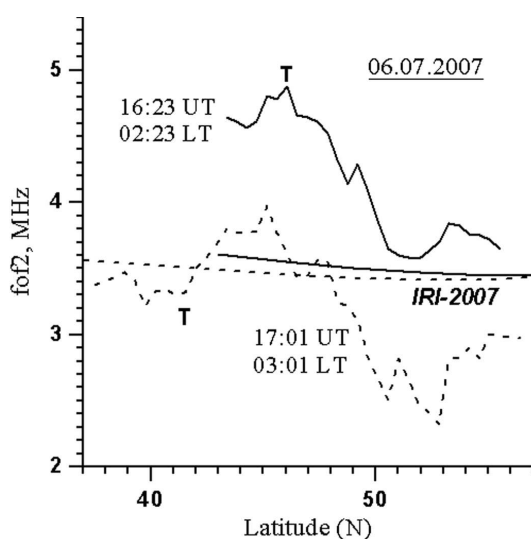


Рис. 3. Широтная зависимость критической частоты F2, измеренной 6 июля 2007 г. над о.Сахалин

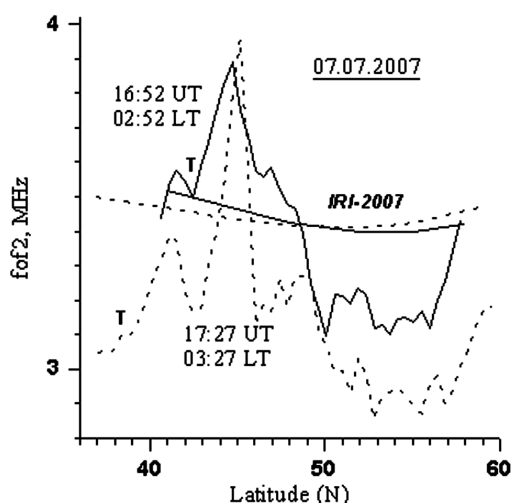


Рис. 4. Широтная зависимость критической частоты F2, измеренной 7 июля 2007 г. над о.Сахалин

Данные томографического зондирования, полученные 24 сентября (рис. 6) скорее свидетельствуют об отсутствии возмущений. ТЦ в это время находился на широте 111° E, достаточно западнее от места съемок. Некоторое увеличение значений параметра foF2 в интервале широт 40-46° N сложно связать с влиянием ТЦ.

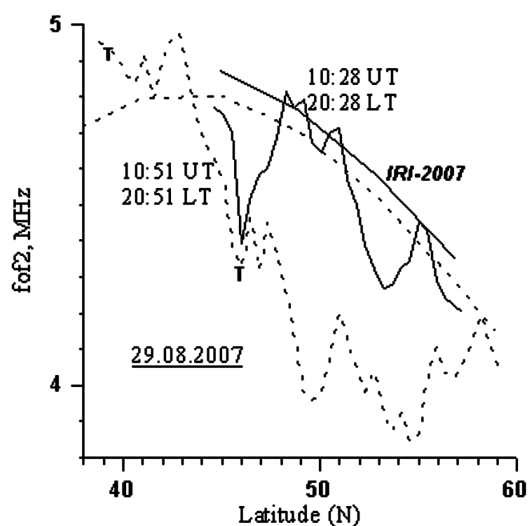


Рис. 5. Широтная зависимость критической частоты F2, измеренной 29 августа 2007 г. над о.Сахалин

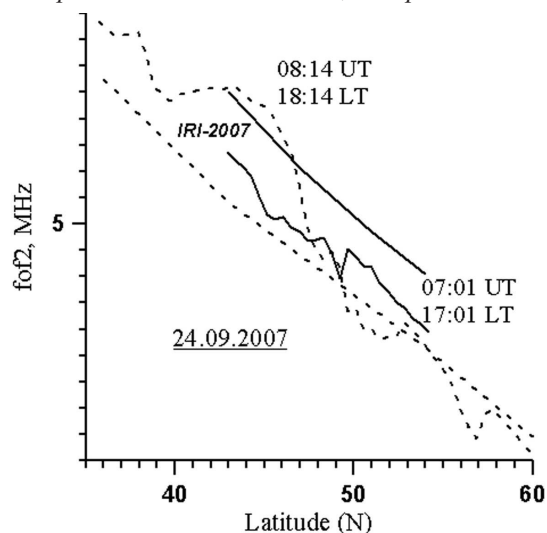


Рис. 6. Широтная зависимость критической частоты F2, измеренной 24 сентября 2007 г. над о.Сахалин

На рис. 7 и 8 представлены результаты зондирования от 20 и 23 ноября. Эти съемки происходили во время деятельности нескольких ТЦ. Один из них, получивший название «Typhoon-2 MITAG» (см. http://weather.unisys.com/hurricane/w_pacific/2007H/index.html) 20 ноября находился вблизи по долготе (137° E) от места съемок в стадии депрессии, но 23 ноября он превратился в ТЦ-2, хотя по долготе сместился до 126° E. Другой тайфун, получивший название «Typhoon-2 HAGIBIS» (см. http://weather.unisys.com/hurricane/w_pacific/2007H/index.html), 20 ноября находился в стадии ТШ около меридиана 120° E, а 23 ноября он зафиксирован в районе 1110° E уже в стадии ТЦ-1. На обоих рисунках мы видим тенденцию к значительному расхождению экспериментальных кривых в широтном диапазоне $40-50^{\circ}$ N. Это опять свидетельствует о возмущении, распространяющемся с юга, что, в свою очередь, возможно и связано с ожидаемым влиянием ТЦ. Особенно примечателен рис. 7 для 20 ноября. Здесь расхождение, связанное с возмущением, между кривыми достигало порядка 40 процентов. 23 ноября, данные за одну из серий съемки (в 10.28 LT) в интервале широт $40-45^{\circ}$ N отсутствовали.

В данной статье мы пока опустим дискуссию на тему «сопоставления абсолютных значений измеренного параметра foF2 с модельными значениями IRI-2007». Но, как видно из полученных результатов, в одних случаях они очень близки, а в других значительно расходятся.

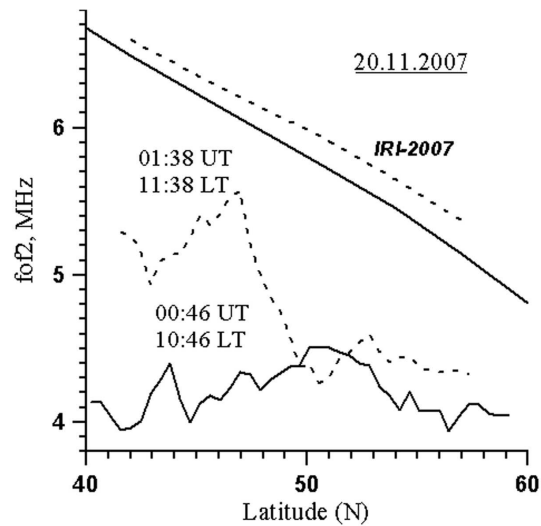


Рис. 7. Широтная зависимость критической частоты F2, измеренной 20 ноября 2007 г. над о.Сахалин

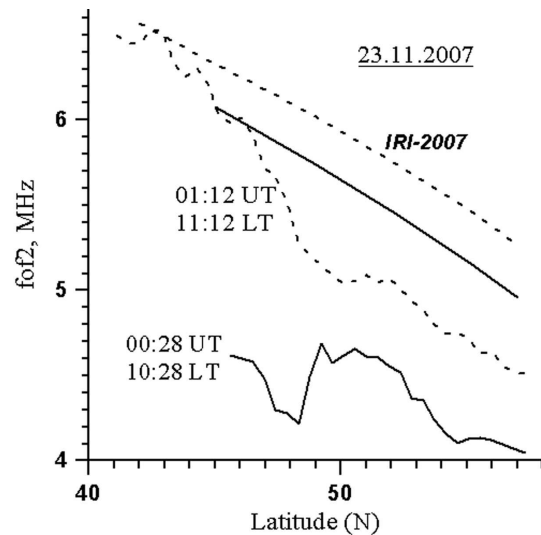


Рис. 8. Широтная зависимость критической частоты F2, измеренной 23 ноября 2007 г. над о.Сахалин

Выводы

Как было отмечено в результатах предыдущей статьи, мы видим, что сложности нахождения отклика тропического циклона в ионосфере (с очень непростой морфологией) связаны с тем, что ТЦ является «широкополосным» источником возмущений, действующим в течение достаточно долгого временного периода. Внутренние гравитационные волны и являются скорее всего предполагаемым источником переноса возмущения снизу. И, конечно, мы имеем дело с результатом их сложения. Результаты представленной обработки позволяют сделать вывод о том, что влияние предполагаемого источника возмущения в виде ТЦ на высотах слоя F2 начинает значительно падать на расстоянии около 4000-5000 км от него вдоль направления «восток-запад» или «запад-восток» по горизонтали. Вдоль направления «юг-север» в северном полушарии это влияние также «обрезается» широтой около 50°N (на расстоянии до 6500 км по горизонтали). Этот факт вполне объясним с точки зрения изме-

нения природы формирования ионосферы в более северных широтах, приближающихся к полярным.

В заключение, хочется отметить, что в отдельных случаях ионосферное возмущение может достигать значительных значений – до 40 % изменения абсолютного значения ионосферного параметра. Данный факт изменяет представление о прежних значениях в интервале 10-20 %. Это вполне сравнимо с возмущениями, полученными в период восхода и захода Солнца («восходно-заходный» эффект).

Необходимо дальнейшее изучение предполагаемого влияния ТЦ на ионосферу (как на нижнюю, так и верхнюю) с целью коррекции используемых ионосферных моделей.

Литература

1. Андреева Е.С., Куницын В.Е., Терещенко Е.Д. Фазоразностная радиотомография ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия, 1992. Т. 32. № 1. С. 104-110.
2. Ванина-Дарт Л.Б., Романов А.А., Шарков Е.А. Влияние тропического циклона на верхнюю ионосферу по данным томографического зондирования над о.Сахалин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2010. Т.7, № 1. С. 173-189.
3. Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С. Радиотомография ионосферы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007.
4. Романов А.А., Трусов С.В., Романов А.А., Крючков В.Г. Исследование ионосферных неоднородностей методом фазоразностной томографии в дальневосточном регионе России // Исследование Земли из космоса. 2008. № 2. С. 14-20.

The Ionosphere F2-layer Variations under Tropical cyclone influence by tomography sounding data

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

¹Space Research Institute of RAS,

117997 Moscow, 84/32 Profsoyuznaya str.

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

²FGUP «The Russian scientific research institute of Space instrument making»,

111250, Moscow, 53 Aviamotornaya str.

E-mail: romulas@rniikp.ru

In this paper tomography sounding data taken in November 2007 are considered for following three points located on one meridian: Uzhno-Sahalinsk (47° N, 143° E), Poronajsk (49° N, 143° E) and Nogliki (52° N, 143° E). The aim of this research is to find the possible influence of tropical cyclone (TC) on the higher ionosphere. Using the ionospheric tomography method, which based on low orbital satellite navigating system signals, allows revealing variations of ionospheric parameters of the strong cyclones caused by distribution in troposphere of the Earth. It is impossible to reach it by only using global satellite navigating systems GLONASS and GPS. Received results suggest that a TC may impact on the upper ionospheric parameter values by as much as 40%. The influence of potential disturbance source (TC) on the F2 layer heights decreases sharply after a distance of 4000-5000 km from TC centre in the “east- west» axes. Complexities of the morphological analysis of the given phenomenon consist that TC is “a broadband” and long-running source of disturbance. This work is supported by RFBR (grant №9-05-01019-a).

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