

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ВАРИАЦИИ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ ИОНОСФЕРНОГО СЛОЯ F2 ПО ДАННЫМ ТОМОГРАФИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ТРОПИЧЕСКОГО ЦИКЛОНА

© 2011 г. Л. Б. Ванина-Дарт^{1*}, А. А. Романов², Е. А. Шарков¹

¹ Учреждение Российской академии наук Институт космических исследований РАН, Москва

² ОАО Российская корпорация ракетно-космического приборостроения и информационных систем, Москва

* E-mail: vandart@iki.rssi.ru

Поступила в редакцию 16.06.2010 г.

В работе анализируются данные томографического зондирования, которое проводилось в ноябре 2007 г. над тремя пунктами, расположенными на одном меридиане: Южно-Сахалинск (47° с.ш., 143° в.д.), Поронайск (49° с.ш., 143° в.д.) и Ноглики (52° с.ш., 143° в.д.) в поиске возможного влияния тропического циклона (ТЦ) на верхнюю ионосферу. Использование метода ионосферной томографии на базе сигналов низкоорбитальных спутниковых навигационных систем позволяет выявлять вариации ионосферных параметров, вызванных распространением сильных циклонов в тропосфере Земли, чего принципиально нельзя достигнуть только с использованием глобальных спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС и GPS. Полученные результаты свидетельствуют о том, что после нескольких суток действия ТЦ наблюдается понижение значений критической частоты слоя F2 на расстоянии около 3000 км от очага возмущения по горизонтали (в долготном направлении). Также вблизи зоны действия ТЦ (по долготе) и на протяжении 1–2 сут может наблюдаться повышение значений f_oF2 . Сложности морфологического анализа данного явления заключаются в том, что ТЦ является “широкополосным” и длительно действующим источником возмущения.

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

ВВЕДЕНИЕ

Атмосферно-ионосферное взаимодействие является одним из самых интересных и перспективных прикладных направлений в геофизике. Ионосфера Земли моментально реагирует на изменения со стороны падающего космического излучения, а также со стороны состава нейтральной атмосферы. Отклонения в поведении параметров ионосферы 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 такому очень важному тропосферному явлению, как тропический циклон (ТЦ). Точки зрения о возможном влиянии этого явления на ионосферу расходятся. Если в одних работах авторы находят возможный отклик ТЦ в нижней (Михайлов и др., 2005; Ванина-Дарт и др., 2007а; Ванина-Дарт и др., 2007б; Бондур и др., 2008а; Бондур и др., 2008б), верхней (Bauer, 1957; Bauer, 1958; Shen, 1982) или даже во внешней ионосфере (Mikhailova et al., 2002), то, например, в работе (Афраймович и др., 2008) результат отрицателен. Стоит отметить, что исследования в этом направлении ведутся более 60 лет (Gherzi, 1950). Они сопряжены с большими

сложностями доказательства действия гипотетически предложенных механизмов воздействия ТЦ на ионосферу. ТЦ являются самыми мощными тропосферными катастрофами, которые могут формировать принципиально иные (“быстрые”) механизмы. Последние связаны с мощными выбросами заряженных частиц и нейтралов и излучением акустогравитационных и низкочастотных электромагнитных волн из центральных зон ТЦ на значительные высоты и расстояния от ТЦ.

Впервые идеи о том, что исследования взаимодействия ТЦ с системой “океан–атмосфера” не могут ограничиваться тропосферой и должны базироваться на рассмотрении крупномасштабного кризисного состояния как глобального явления, затрагивающего различные геофизические среды, начиная с океанической поверхности и тропосферы и кончая ионосферой и магнитосферой, были высказаны в 1996 г. сотрудниками Института космических исследований РАН (ИКИ РАН) (Балбанов и др., 1996). Изучение кинематических, термодинамических и электродинамических связей между элементами системы “океан–тропосфера–ионосфера–магнитосфера” в кризисных состояниях, несомненно, должно явиться важнейшей компо-

ненной космических исследований. В настоящее время предпринимаются попытки организации комплексных исследований при помощи ракетного, радиолокационного ионосферного зондирования и оптических съемок собственного (ночного) излучения верхней атмосферы с поверхности Земли и со специализированных космических аппаратов (КА) (Шарков, 2010).

В работах (Ванина-Дарт и др., 2007а, Ванина-Дарт и др., 2007б; Ванина-Дарт и др., 2008) представлены результаты комплексной обработки данных ракетного зондирования экваториальной нижней ионосферной области с ракетного полигона “Тумба” (Индия) в районе действия сильных тропосферных вихревых возмущений – ТЦ. На основе синхронного анализа серии ракетных измерений электронной концентрации и термодинамических параметров нижней ионосферы в экваториальной области, а также дистанционных данных по тропическому циклогенезу в северной части Индийского океана был впервые зарегистрирован экспериментальный факт понижения N_e в области D на расстоянии около 1000 км (по горизонтали) от ядра ТЦ, действующего в активной фазе (Ванина-Дарт и др., 2008). Наибольшего понижения N_e , в среднем в 3–4 раза, достигает на высотах 71 ± 3 км. При этом нижняя граница слоя D поднималась на несколько километров (не более пяти). В работе был предложен вариант гипотетического физического механизма “быстрых” взаимодействий тропосферных возмущений с состоянием ионосферы – внутренние гравитационные волны (ВГВ), порождаемые ТЦ.

Принципиально иной подход для верхней ионосферы рассматривается в работе (Черниговская и др., 2008). Были проанализированы короткопериодные (порядка десятков минут, часов) временные вариации максимальных наблюдаемых частот (МНЧ) сигналов наклонного радиозондирования вдоль среднеширотной трассы Магадан–Иркутск (средняя точка трассы находится южнее Якутска) для сентября месяца 2005–2007 гг. Проведенный анализ выявил временные интервалы с повышенной энергетикой короткопериодных колебаний характерной формы (волновой пакет), которые можно интерпретировать как проявление крупномасштабных перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ), источниками которых являются ВГВ с периодами 1–5 ч.

В настоящей работе авторы попытались продолжить поиск возможного ионосферного отклика ТЦ, но уже в верхней ионосфере (предыдущие работы были посвящены поиску в области D). Используемые данные были получены методом фазоразностной томографии. Отличительной особенностью метода ионосферной томографии на базе сигналов низкоорбитальных навигационных систем является возможность выявления вариаций электронной концентрации, вызванных, например, распространением сильных циклонов в тропосфере Земли, чего принципиально нельзя достигнуть только с использованием глобальных спутниковых навига-

онных систем ГЛОНАСС и GPS. В отличие от фазовой томографии, где интегральной величиной является полная фаза, фазоразностный метод более чувствителен к относительно малым неоднородностям электронной концентрации, которые вносят незначительный вклад в фазу, и более существенный – в ее производную.

Цель данной работы – поиск возможного влияния ТЦ на верхнюю ионосферу на основе томографических данных, полученных на о. Сахалин за 2007 г. Наблюдения проводились над тремя пунктами, расположенными на одном меридиане (143° в.д.): Южно-Сахалинск (47° с.ш., 143° в.д.), Поронайск (49° с.ш., 143° в.д.) и Ноглики (52° с.ш., 143° в.д.).

БАЗА ДАННЫХ И МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Описание метода

Теоретической основой лучевой РТ-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 N_e и эффективной частоты соударений ν :

$$\begin{aligned} \phi &= \lambda r_e \int N_e d\sigma, \\ \chi &= -\frac{\lambda r_e}{\omega} \int N_e \nu d\sigma \end{aligned} \quad (1)$$

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 (Куницын и др., 2007), связанную с пересчетом фазы с одной частоты на другую. Основная возникающая трудность по определению этого интеграла состоит в том, что величина фазы весьма велика. Для характерных значений $N_e \sim 10^{12} \text{ м}^{-3}$, $\lambda = 2$ 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 ли-

нейный 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 использовании в качестве интегральной характеристики производной фазы df/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 структуру размером 100 км и величиной электронной концентрации 4–6% от концентрации максимума (Андреева и др., 1992; Куницын и др., 2007). 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).

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 работой (Куницын и др., 2007), из рассмотрения модельной задачи распространения в параболическом по высоте слое ионосферы

$$N_{e_0} = N_{e_m} \left(1 - \frac{(h - h_m)^2}{y_m^z} \right), \quad (2)$$

где y_m – полутолщина, а h_m и N_{e_m} – высота и максимум электронной концентрации слоя ионосферы.

В соответствии с решением лучевых уравнений (Куницын и др., 2007), величина смещения траектории $\Delta\tau$ и отклонения траектории Δh от прямолинейной с углом θ_0 к вертикали

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

где $f_0 = \sqrt{(r_e N_{e_m} c^2) / (3 \cos^2 \theta_0)}$ – критическая частота заданного параболического слоя, f – частота зондиро-

вания. При $f_0 = 5\text{--}10$ МГц, $f = 150$ МГц, $y_m = 150$ км, $0 \leq \theta_0 \leq 80^\circ$, $\Delta\tau \approx 5\text{--}25$ км, тогда как $\Delta h \approx 1\text{--}5$ км.

В соответствии с приведенными выше оценками и соотношениями (3), с использованием метода ионосферной томографии на базе сигналов низкоорбитальных навигационных систем можно восстановить вертикальное распределение N_e вдоль трассы пролета спутника с разрешением не менее $\Delta\tau \times \Delta h = 20 \times 10$ 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.

Результаты численного моделирования реконструкции распределения электронной концентрации в ионосфере

Для оценки качества тематической обработки данных радиопросвечивания с использованием предложенной методики (Урличич и др., 2006) 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).

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

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

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 $\delta_m = 0.10$ и уменьшаются по мере упорядочения структуры ионосферы.

Результаты экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования качества функционирования разработанной системы сбора и обработки данных радиопросвечивания ионосферы проводились с использованием сети приемных установок, расположенных на о. Сахалин.

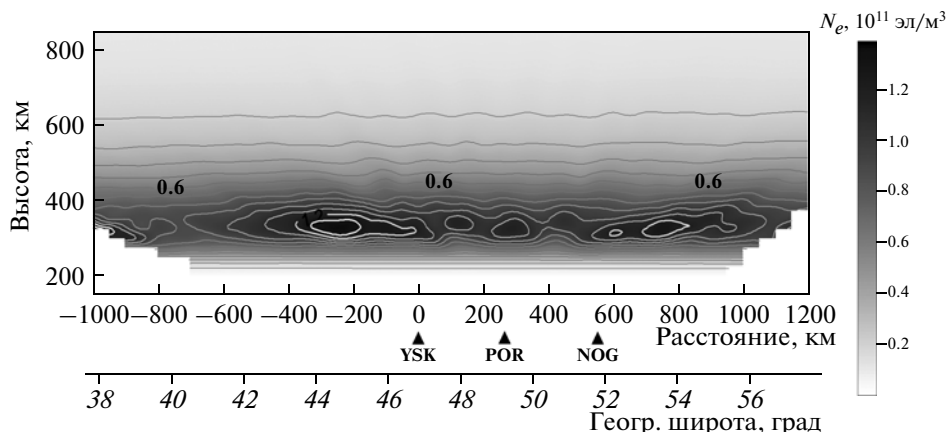


Рис. 1. Распределение электронной концентрации 29.07.2007 г. (00:30 LT) в районе о. Сахалин: YSK – пункт Южно-Сахалинск; POR – пункт Поронайск; NOG – пункт Ноглики.

Результаты работы системы сбора и обработки данных радиопросвечивания ионосферы представляют собой высотно-широтное распределение электронной концентрации (рис. 1). На рис. 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.

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 ($\delta_2 = 0.9–0.11$) (Куницын и др., 2007).

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 ДАННЫХ ТОМОГРАФИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗА НОЯБРЬ 2007 г.

Анализ ионосферных данных является многопараметрической задачей. Электронная концентрация в области F2 зависит от интенсивности падаю-

щего коротковолнового излучения (в основном в освещенные часы) и корпускулярного (в основном ночью), зенитного угла Солнца (что связано со временем суток), сезона, гелиогеомагнитной обстановки и др. параметров. Учитывая положение о. Сахалин, мы должны иметь также информацию о сейсмической активности (в целях устранения фактора влияния землетрясений на верхнюю ионосферу в нашем случае). 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 (Гохберг и др., 1983; Гохберг, Шалимов, 2008; Липеровский и др., 1992; Пулинец и др., 1998; Смирнов, 2001; Pulinets, Boyarchuk, 2004) перечис-

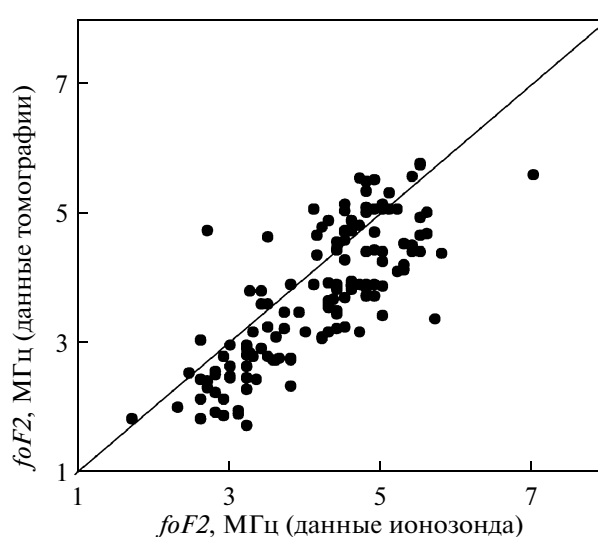


Рис. 2. Сопоставление значений критической частоты $foF2$, полученных в результате томографии ионосферы с данными ионозонда Вакканай.

Таблица 1. Гелиогеомагнитная обстановка на время проведения томографического зондирования

Дата измерения N_e	Время измерения N_e , UT	$F_{10.7}$	Dst , нТ	Kp
05.11.2007	02:25	66	-2	1
07.11.2007	03:50	67	0	0
	21:17		2	
08.11.2007	23:06	68	5	то же
	02:05		8	
11.11.2007	03:24	то же	11	»
	01:45		-1	
	02:57		-2	

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

Дата измерения N_e	Данные о ТЦ				
	Широта, град	Долгота, град	Время, мм/дд/чч (UT)	Скорость ветра, узел	Стадия ТЦ
05.11.2007	16.80	122.5	11/04/12	33	T-1
07.11.2007	18.00	116.2	11/07/06	то же	то же
08.11.2007	16.80	114.1	11/08/00	21	TS
11.11.2007	20.00	139.9	11/11/06	15	TD

лены основные характеристики ионосферных предвестников сильных землетрясений.

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, при которых в области приемных установок радиопросвечивания ионосферы длительное время отсутствовали землетрясения. На сайте www.sakhmeteo.ru Сахалинской Гидрометеослужбой представлены сейсмические данные, которые использовались в настоящей работе. В ноябре 2007 г. землетрясения в районе о. Сахалин отсутствовали. С учетом этого фактора авторы рассмотрели четыре серии съемок, которые были проведены в первой половине ноября 2007 г. В табл. 1 представлены информация о гелиогеомагнитной обстановке для этих серий томографического зондирования, а также индекс солнечной активности $F_{10.7}$, индексы геомагнитной активности Dst и Kp для каждой съемки. Как видно из таблицы, обстановка для данных моментов времени была очень спокойной, соответственно влиянием со стороны гелиогеомагнитной активности на изменение области F2 можно пренебречь.

В табл. 2 представлены географическое положение, скорость ветра и стадия ТЦ, расположенных наиболее близко к о. Сахалин, а также указано время проведения сбора данных о ТЦ. Более полную информацию об этих ТЦ можно найти по адресу <http://weather.unisys.com/hurricane/>. Мы же выбра-

ли 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 табл. 3 и 4. Все съемки томографического зондирования были проведены в один сезон, когда землетрясения в районе о. Сахалин отсутствовали долгое время. Также 5, 8 и 11 ноября можно пренебречь зависимостью N_e от положения Солнца – съемки проводились около местного полдня. 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. В качестве исследуемого параметра был выбран параметр f_oF2 – критическая частота слоя F2. Как известно, f_oF2 является наиболее высокой частотой, отраженной от ионосферного слоя F2 при вертикальном зондировании. Ее значение связано простым выражением с $N_{e\max}$ – максимальным значением электронной концентрации в слое F2: $f_oF2 = 9 (N_{e\max})^{1/2}$, где электронная концентрация измеряется в m^{-3} , а частота в Гц (Брасье и Соломон, 1987).

Были получены следующие морфологические результаты в диапазоне широт 45° – 53° с.ш. (был выбран именно этот диапазон, поскольку он покрывает все серии четырех съемок).

5 ноября 2007 г. съемка происходила с интервалом 1 ч 25 мин (рис. 3). В диапазоне широт 45° – 53° с.ш.

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

№ п/п	Широта, град	Долгота, град	Время, мм:дд:чч (UT)	Скорость ветра, узел	Стадия ТЦ
1	17.70	132.90	11:01:18	15	ТД
2	18.00	132.60	11:02:00	то же	то же
3	18.30	132.30	11:02:06	20	»
4	18.50	131.40	11:02:12	15	»
5	18.80	130.50	11:02:18	20	»
6	18.40	129.60	11:03:00	то же	»
7	18.20	128.50	11:03:06	25	»
8	18.10	127.20	11:03:12	35	ТШ
9	17.50	126.10	11:03:18	45	то же
10	17.00	124.90	11:04:00	50	»
11	16.80	123.60	11:04:06	60	»
12	16.80	122.50	11:04:12	65	Т-1
13	17.20	120.90	11:04:18	то же	то же
14	17.50	120.00	11:05:00	55	ТШ
15	17.60	119.60	11:05:06	то же	то же
16	17.70	119.20	11:05:12	»	»
17	18.00	118.80	11:05:18	60	»
18	18.40	118.60	11:06:00	70	Т-1
19	18.60	118.40	11:06:06	75	то же
20	18.70	118.20	11:06:12	то же	»
21	18.50	117.70	11:06:18	»	»
22	18.30	117.10	11:07:00	70	»
23	18.00	116.20	11:07:06	65	»
24	17.60	115.40	11:07:12	55	ТШ
25	17.30	114.70	11:07:18	50	то же
26	16.80	114.10	11:08:00	40	»
27	16.30	113.40	11:08:06	35	»
28	15.80	112.80	11:08:12	то же	»
29	14.80	112.20	11:08:18	»	»
30	13.70	111.60	11:09:00	30	ТД
31	12.60	111.40	11:09:06	25	то же
32	12.20	111.10	11:09:12	то же	»
33	11.80	110.30	11:09:18	»	»
34	11.50	109.60	11:10:00	20	»
35	11.50	108.50	11:10:06	то же	»

параметр f_oF2 изменялся как в 12:25 LT (местное время), так и в 13:50 LT, со средними значениями 5.04 и 3.98 МГц. Максимумы были зарегистрированы со значением 5.47 МГц (в 12:25 LT) и 4.09 МГц (в 13:50 LT). Коэффициент корреляции между измере-

ниями двух серий в указанном широтном диапазоне $R = 0.38$ (количество измерений – 18). Также на рис. 3 представлены модельные широтные зависимости f_oF2 (сплошная линия соответствует времени 12:25 LT, штриховая линия – 13:50 LT). Модельные

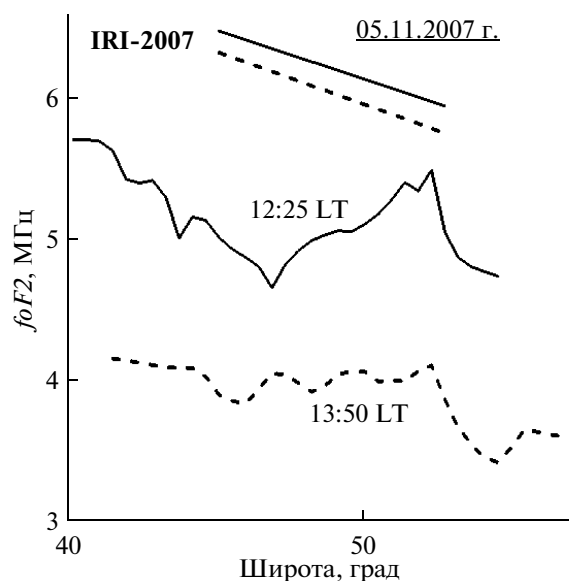


Рис. 3. Широтная зависимость критической частоты $foF2$, измеренной 5 ноября 2007 г. над о. Сахалин.

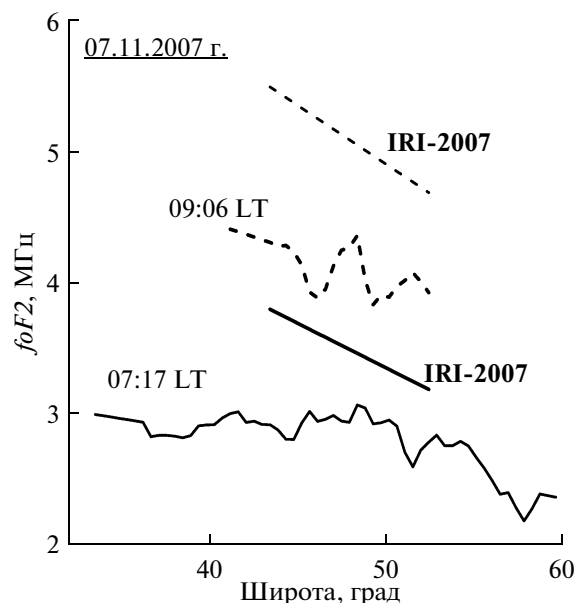


Рис. 4. Широтная зависимость критической частоты $foF2$, измеренной 7 ноября 2007 г.

линии были построены с помощью международной ионосферной модели IRI-2007 (http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri_vitmo.html).

7 ноября 2007 г. (рис. 4) съемка происходила с интервалом 1 ч 49 мин. В диапазоне широт 45° – 53° с.ш. $foF2$ претерпевала изменения со средними значениями 2.90 и 4.03 МГц. 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 2007 г. (рис. 5) съемка происходила с интервалом 1 ч 19 мин. В диапазоне 45° – 53° с.ш. 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 значением 5.74 МГц (в 12:05 LT) и 5.0 МГц (в 13:24 LT). $R = 0.94$ (количество измерений – 18).

11 ноября 2007 г. (рис. 6) съемка происходила с интервалом 1 ч 12 мин. В диапазоне широт 45° – 53° с.ш. $foF2$ изменялась как в 11:45 LT, так и в 12:57 LT со средними значениями 5.25 и 4.81 МГц. Максимумы

Таблица 4. Данные о прохождении ТЦ 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 ТЦ
1	16.30	147.70	11:09:06	15	ТД
2	17.00	146.00	11:09:12	то же	то же
3	17.50	144.60	11:09:18	»	»
4	18.00	143.40	11:10:00	»	»
5	18.50	142.20	11:10:06	»	»
6	18.90	141.40	11:10:12	»	»
7	19.40	140.60	11:10:18	25	»
8	19.70	140.20	11:11:00	то же	»
9	20.00	139.90	11:11:06	30	»
10	20.40	139.90	11:11:12	то же	»
11	21.20	140.60	11:11:18	35	ТШ
12	22.20	142.00	11:12:00	то же	то же
13	23.20	143.60	11:12:06	»	»
14	24.10	146.00	11:12:12	»	»
15	26.40	149.70	11:12:18	25	ТД

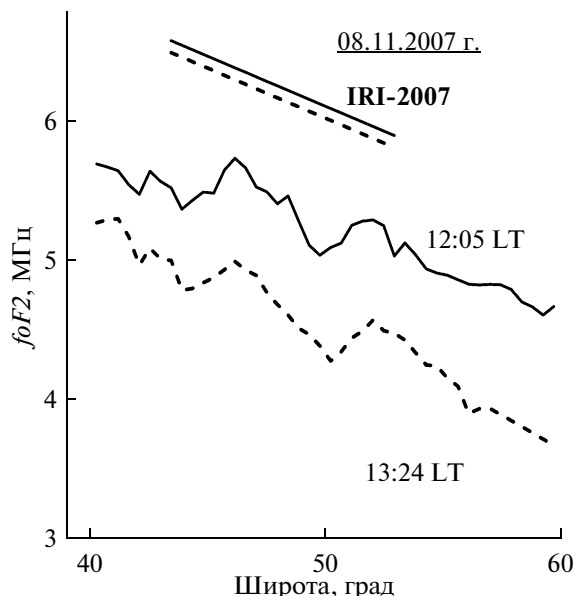


Рис. 5. Широтная зависимость критической частоты $foF2$, измеренной 8 ноября 2007 г.

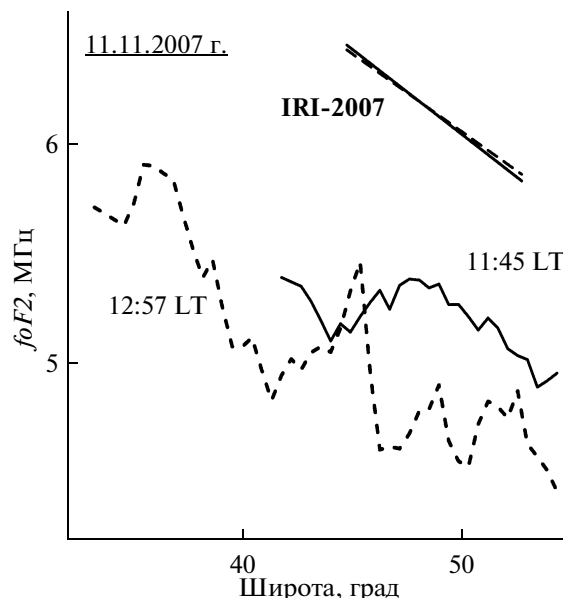


Рис. 6. Широтная зависимость критической частоты $foF2$, измеренной 11 ноября 2007 г.

мы были зарегистрированы со значением 5.39 МГц (в 11:45 LT) и 5.46 МГц (в 12:57 LT). $R = 0.26$ (количество измерений – 18).

Как видно из рис. 3, 5, 6, расхождение между двумя экспериментальными кривыми проведенной съемки больше рассчитанного по модели. Особенно велико расхождение 5 ноября 2007 г. (рис. 3), а 11 ноября 2007 г. (рис. 6) оно наименьшее. Сами же значения параметра $foF2$, полученные в эксперименте, меньше соответственно рассчитанных значений по модели.

На рис. 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 2007 г., сильно отличается от других (примерно в 1.5 раза меньше по значению). Это является интересным фактом, поскольку уже были работы, в которых отмечалось понижение параметра $foF2$, отождествлявшееся с влиянием ТЦ. Отметим, что 5 ноября 2007 г. ТЦ в стадии 1 локализовался приблизительно на 30° южнее и на 20° западнее от места получения экспериментальных данных в горизонтальной проекции над о. Сахалин. Также стоит отметить, что практически за полтора часов интервал съемок критическая частота слоя F2 достигла максимального различия в 1.35 раза в районе 51.5° с.ш. и минимального в 1.15 раза в районе 47° с.ш. На рис. 6 и 7 также является интересным факт явного возмущения (“вздутия”), зафиксированного 11 ноября 2007 г. Съемка, как отмечалось выше, проходила с интервалом чуть более 1 ч. При этом критическая частота, полученная в первой серии в 11:45 LT, несколько ($\leq 10\%$) превышала значения от 47° с.ш. до 54° с.ш. с максимумом на 48° с.ш., по сравнению со второй

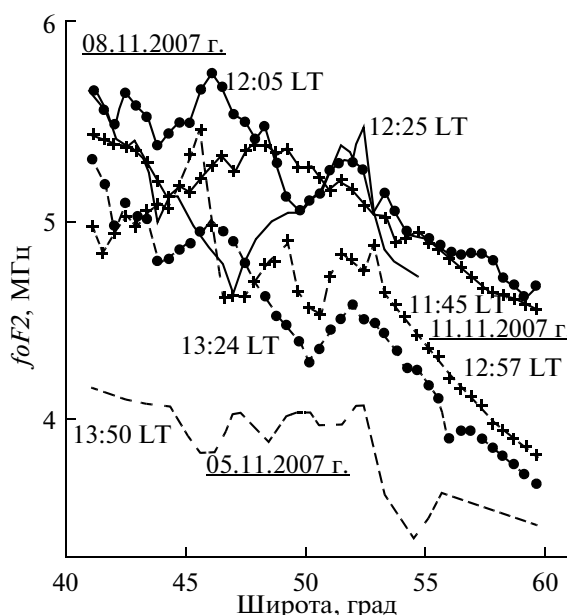


Рис. 7. Сравнение широтных зависимостей критической частоты $foF2$, измеренной 5, 8, 11 ноября 2007 г. над о. Сахалин.

серией, полученной в 12:57 LT. В серии за 12:57 LT выделяются три отчетливых максимума на широте 45° , 50° и 53° с.ш. Также является примечательным факт еще одного большого максимума в районе 36° с.ш., что, скорее всего, является фактом распространения возмущения с юга. А ведь 11 ноября 2007 г. 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 широтную зависимость, которая выражается в виде разнопериодных колебаний параметра $foF2$. В таком меридиональном разрезе максимальный эффект возмущения параметра $foF2$, распространяющегося с запада на восток (или наоборот), мы можем ожидать в виде расхождений между кривыми одной съемки, когда коэффициент корреляции между измерениями двух серий близок к единице (как, например, на рис. 5, для 8 ноября 2007 г.).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На всех представленных рис. 3–6 видно, что значения экспериментальных данных ниже рассчитанных модельных (IRI-2007) значений. Это может иметь связь либо с систематической ошибкой метода, либо с несовершенностью данной модели.

Как было отмечено выше, наиболее интересными являются результаты, полученные 5 и 11 ноября 2007 г. Из табл. 4 видно, что 5 ноября 2007 г. ТЦ находился в стадии тропического шторма, но менее чем за сутки – в стадии ТЦ-1 (около 121° в.д.). Также следует учесть, что данный ТЦ зарождался на 133° в.д.

Занижение значений (отбросив систематическую ошибку измерений) параметра $foF2$, полученного экспериментально, является далеко неслучайным. На рис. 3 показано, что в 13:50 LT 5 ноября 2007 г. критическая частота слоя F2 была меньше предполагаемого приблизительно в 1.35 раза. В работе (Tian et al., 2009) было показано, что после суток над зоной прохождения ТЦ электронная концентрация падает. Также в работе (Ванина-Дарт и др., 2008) наблюдалось понижение N_e где-то через сутки до начала действия ТЦ и на расстоянии около 1000 км (по горизонталю) от ядра ТЦ.

Напротив, мы имеем повышение значений $foF2$ (широтное “вздутие”) в 11:45 LT от 45° до 55° с.ш. и очень неравномерный ход в 12:57 LT (рис. 6). 11 ноября ТЦ находился в стадии тропической депрессии на долготе 140° в.д. (а зарождался на 147° в.д.), 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 этой работы считают, что понижение или повышение полного электронного содержания (ПЭС) в ионосфере зависит от положения ТЦ в период пересечения береговой суши (если рассматривать трек ТЦ в горизонтальной проекции по отношению к Земле). Их основной вывод заключается в следующем: до “приземления” тайфуна значение ПЭС выше ежемесячного медианного значения ПЭС, но после “приземления” ТЦ становится значительно ниже, достигая минимума через сутки. Наблюдения рассматривались строго над зоной самого ТЦ.

В нашем случае из представленных серий съемок мы имеем только один случай, когда ТЦ действительно пересекал материк за сутки до наблюдения ионосферных параметров, 5 ноября 2007 г., 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 суммой воздействия волн различной природы от источника возмущения различных периодов (от часов и даже до нескольких суток!) на протяжении нескольких суток.

ВЫВОДЫ

На основе приведенного выше анализа данных томографического зондирования, полученных в ноябре 2007 г. на о. Сахалин, можно сделать вывод, что возможным откликом верхней ионосферы, локализуемой над зоной ТЦ (в данном случае на 25° – 30° севернее и на 5° – 20° – западнее или восточнее) на расстоянии приблизительно от 3800 до 5500 км от центра ТЦ, является изменение ее 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.

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

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).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреева Е.С., Куницын В.Е., Терещенко Е.Д. Фазоразностная радиотомография ионосферы // Геомагнетизм и аэрномия. 1992. Т. 32. № 1. С. 104–110.
- 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. 2008. Т. 48. № 5. С. 703–708.
- Балебанов В.М., Моисеев С.С., Шарков Е.А., Луян Е.А., Калмыков А.И., Забышный А.И., Кузьмин А.К., Смирнов Н.К., Цымбал В.Н., Чиков К.Н. Проект “Геликс”: космический мониторинг системы океан–тропосфера–верхняя атмосфера в условиях крупномасштабного кризисного состояния // Исслед. Земли из космоса. 1996. № 5. С. 126–134.
- Бондур В.Г., Пулинец С.А., Узунов Д.А. Воздействие крупномасштабных атмосферных вихревых процессов на ионосферу урагана Katrina // Исслед. Земли из космоса. 2008. № 6. 2008. С. 3–11.
- Бондур В.Г., Пулинец С.А., Ким Г.А. О роли вариаций космических галактических лучей в тропическом циклоге-

- незе на примере урагана Катрина // ДАН. 2008. Т. 422. № 2. С. 244–249.
- Ванина-Дарт Л.Б., Покровская И.В., Шарков Е.А. Реакция нижней экваториальной ионосферы на сильные тропосферные возмущения // Геомагнетизм и аэрномия. 2008. Т. 48. № 2. С. 255–260.
- Ванина-Дарт Л.Б., Покровская И.В., Шарков Е.А. Исследование взаимодействия нижней экваториальной ионосферы с тропическими циклонами по данным дистанционного и ракетного зондирования // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 2. С. 19–27.
- Ванина-Дарт Л.Б., Покровская И.В., Шарков Е.А. Влияние солнечной активности на отклик экваториальной нижней ионосферы во время активной фазы тропических циклонов // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 6. С. 3–10.
- Гохберг М.Б., Пилипенко В.А., Похотелов О.А. О сейсмических предвестниках в ионосфере // Физика Земли. 1983. Т. 10. С. 17–21.
- 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, 1992. 304 с.
- Михайлов Ю.М., Михайлова Г.А., Капустина О.В., Дружин Г.И., Чернева Н.В. Возможные атмосферные эффекты в нижней ионосфере по наблюдениям атмосферных радиосуммов на Камчатке во время тропических циклонов // Геомагнетизм и аэрномия. 2005. Т. 45. № 6. С. 824–839.
- 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. 2002. Т. 42. № 4. С. 435–447.
- Пулинец С.А., Легенька А.Д., Зеленова Т.И. Зависимость сейсмо-ионосферных вариаций в максимуме слоя F от местного времени // Геомагнетизм и аэрномия. 1998. Т. 38. С. 178–183.
- Романов А.А., Трусов С.В., Романов А.А., Крючков В.Г. Исследование ионосферных неоднородностей методом фазоразностной томографии в дальневосточном регионе России // Исслед. Земли из космоса. 2008. № 2. С. 14–20.
- Смирнов В.М. Вариации ионосферы в период землетрясений по данным навигационных систем // Исследовано в России (электр. журн.). 2001. № 153. С. 1759–1767.
- 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.
- Черниговская М.А., Шарков Е.А., Куркин В.И., Орлов И.И., Покровская И.В. Короткопериодные временные вариации ионосферных параметров в регионах Сибири и Дальнего Востока // Исслед. Земли из космоса. 2008. № 6. С. 17–24.
- Шарков Е.А. Дистанционное исследование атмосферных катастроф // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 1. С. 52–68.
- Bauer S.J. A possible troposphere-ionosphere relationship // J. Geophys. Res. 1957. V. 62. № 3. P. 425.
- Bauer S.J. An apparent ionospheric response to the passage of hurricanes // J. Geophys. Res. 1958. V. 63. № 2. P. 265–269.
- Mikhailova G.A., Mikhailov Yu.M. and Kapustina O.V. Variations of ULF-VLF electric fields in the external ionosphere over powerful typhoons in Pacific Ocean // Adv. Space Res. 2002. V. 30. № 11. P. 2613–2618.
- Pulinets S.A., Boyarchuk K.A. Ionospheric Precursors of Earthquakes. Berlin, Heidelberg, N.Y.: Springer-Verlag, 2004. 273 p.
- Shen C.S. The correlations between the typhoon and the $foF2$ of ionosphere // Chin. J. Space Sci. 1982. V. 2. № 4. P. 335–340.
- Tian M., Jing Song W., Guang Lin Y., Tao Y., Jin Song P., Yu Cheng S. Effects of typhoon Matsa on ionospheric TEC // Chin. Sci. Bull. 2009. V. 55. № 8. P. 712–717.

Variations of the Ionospheric Layer F2 Critical Frequency from Tomography Sounding Data during Tropical Cyclone Action

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

¹Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow

²Russian Scientific Research Institute of Space Instrument Making, Moscow

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. The received results demonstrate that after several days of TC action the values of the critical frequency of the F2-layer fall at distance about 3000 km from the disturbance center across (in a longitudinal direction). Also near to the TC operative range (on a longitude) and throughout 1–2 days increasing of values $foF2$ can be observed. Complexities of the morphological analysis of the given phenomenon consist that TC is “a broadband” and long-running source of disturbance.

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