

**О ПРОСТРАНСТВЕННЫХ МАСШТАБАХ СЕЙСМОИОНОСФЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ НА
ОСНОВЕ ДАННЫХ О КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЕ $foF2$ ПО МАТЕРИАЛАМ СТАНЦИЙ
ТОКИО, ПЕТРОПАВЛОВСК-КАМЧАТСКИЙ И ТАШКЕНТ
ON THE SPACE SCALES OF SEISMOIONOSPHERIC EFFECTS ON THE DATA OF
CRITICAL FREQUENCY $foF2$ BY THE DATA OF STATIONS TOKYO,
PETROPAVLOVSK-KAMCHATSKY AND TASHKENT**

Липеровская Е.В.¹, Мейстер К.-В.², Богданов В.В.³, Липеровский В.А.¹

¹ИФЗ РАН, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10

²Технологический Университет, Германия, Дармштадт, Шлоссенгартен штрассе, 9

³ИКИР ДВО РАН, Камчатская обл., Елизовский район, с. Паратунка

Disturbances of $foF2$ - the critical frequency of the main ionospheric maximum, arising a few days before earthquakes with the magnitudes $M > 5$ and depths $H < 80$ km are analyzed in the work using the data of ionospheric stations of Japan, Kamchatka and Middle Asia. Seismoionospheric effects are distinguished on the background of seasonal, geomagnetic, 11-years and 27-days Solar variations. Days with high Solar and geomagnetic disturbances are excluded from the analysis. The superimposed epochs' method is used to reveal that statistically seismoionospheric effects take place at distances $R < \exp(M)$ km for earthquakes with $5 < M \leq 6$.

Введение

Около 30 лет назад при первых попытках обнаружения предвестников землетрясений в вариациях ионосферных параметров, регулярно измеряемых на сети ионосферных станций, было обнаружено, что критическая частота $foF2$, соответствующая плазменной частоте в максимуме слоя F , может испытывать изменения в процессе подготовки землетрясений [1, 2]. В ряде случаев отмечалось уменьшение $foF2$ за несколько суток-часов до толчка [3, 4, 5, 6, 7, 8], при этом оценивались характерные расстояния от эпицентров до станции вертикального зондирования (ВЗ), на которых были заметны эффекты в ионосфере. В монографии [9] авторы полагали, что эти расстояния в основном порядка радиуса области подготовки землетрясения $R_D = \exp(M)$ км [10]. Обычно это составляло менее 1000 км. Однако в ряде статей отмечались эффекты и на расстояниях более тысячи километров [3]. В работе [4] очень сильное увеличение $foF2$ наблюдалось на расстоянии 1000 км от эпицентра – на границе области подготовки для землетрясения с магнитудой $M=7$. В настоящей работе проведен статистический анализ: до какого характерного расстояния наблюдается предвестник: до $\exp(M)$ км или больше, и от чего это расстояние зависит. Зависимость сейсмоионосферных эффектов от расстояния статистически исследована по данным ионосферных станций вертикального зондирования Токио, Петропавловск-Камчатский и Ташкент. При исследовании предполагалось, что длительность сейсмоионосферной аномалии может составлять от нескольких часов до 2 суток.

Экспериментальные данные

По часовым данным ионосферных станций Ташкент ($\varphi=41.3^\circ\text{N}$, $\lambda=69.6^\circ\text{E}$, 1964-1996 гг.), Петропавловск-Камчатский» ($\varphi=53.0^\circ\text{с.ш.}$, $\lambda=158.7^\circ\text{в.д.}$, 1968-1995 гг.) (Токио, $\varphi=35.7^\circ\text{N}$, $\lambda=139.5^\circ\text{E}$, 1957-1990 гг.) <http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/> исследовались вариации критической частоты $foF2$, усредненной за дневные часы 11-16 LT, когда, как известно, степень ионизации ионосферы максимальна, с одной стороны, а с другой стороны, области максимальной ионизации расположены ближе к земной поверхности, чем в другое время суток. Дневная F -область ионосферы формируется при воздействии солнечного ультрафиолетового излучения на нейтральную атмосферу в интервале длин волн 14–80 нм. Высота и плотность главного максимума определяются конкуренцией процессов ионизации за счет солнечного излучения и рекомбинации. Усредненная за указанный выше интервал дневного времени частота $foF2_{\text{day}}$ сложно зависит от сезона, имеет два максимума – весной и осенью, и два минимума – зимой и летом. Кроме того, в ходе $foF2_{\text{day}}$ просматриваются вариации, связанные с 27-дневным солнечным циклом. Имеют место и нерегулярные возмущения состояния ионосферы под действием сильных солнечных и геомагнитных воздействий, поэтому при исследовании эффектов землетрясений рассматривались только те сутки, при которых солнечные и геомагнитные возмущения были не слишком большие. Единой точки зрения по этому вопросу нет. В данной работе исключались из рассмотрения дни с числами Вольфа $W > 120$. Как известно, ионосферные возмущения могут продолжаться сутки после сильных геомагнитных возмущений, поэтому исключались сутки, когда $\Sigma Kp > 30$, и следующие сутки.

Чтобы исключить сезонную зависимость, из текущего значения $foF2_{day}$ вычиталось усредненное по 15 дням – (с -7 по $+7$) для каждого дня значение этой величины: $\Delta f(i) = foF2_{day}(i) - foF2_{15days}(i)$. Короткий интервал усреднения выбран также для уменьшения влияния 27-дневного солнечного цикла. Далее $\Delta f(i)$ нормировалось на её же среднеквадратичное отклонение. Среднеквадратичное отклонение вычислялось по тому же скользящему 15-дневному интервалу. В результате каждый день анализируемого интервала характеризуется значением нормированной функции $F(i) = \Delta f(i) / \sigma(\Delta f(i))$. Поиск сейсмоионосферных эффектов производился с помощью метода наложения эпох для различных выборок землетрясений.

Результаты анализа

Ранее было получено, что по данным станции Токио сейсмоионосферные эффекты статистически наблюдаются для землетрясений с магнитудами $M > 5$, причем за 3-5 дней наблюдается увеличение $foF2$, и это увеличение более заметно для более слабых землетрясений с магнитудами $5 < M < 6$, а затем происходит уменьшение за сутки –двое, причем уменьшение более заметно для более сильных землетрясений $M > 6$ [11]. В процитированной работе рассматривались землетрясения на расстояниях не более 1000 км от станции вертикального зондирования, при этом расстояние от эпицентра до станции не превышало радиуса области подготовки по Добровольскому $R_D = \exp(M)$ км. Результаты наложения эпох для таких сильных и более слабых землетрясений представлены на Рис.1 и Рис.2.

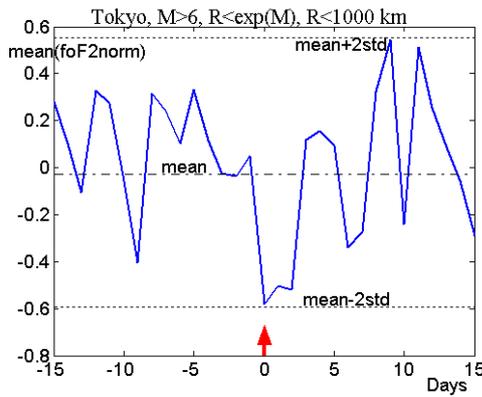


Рис. 1. Результаты наложения эпох для сильных землетрясений $M > 6$

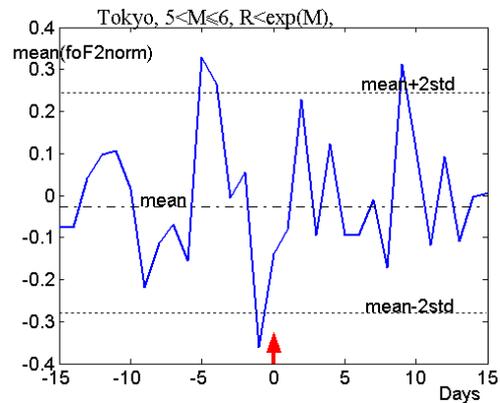


Рис. 2. Результаты наложения эпох для более слабых $5 < M \leq 6$ землетрясений

Для сильных землетрясений с магнитудами $M > 6$ основным предвестниковым эффектом является уменьшение $foF2_{norm}$ на (-1) день, см. рис. 1. В настоящей работе рассматривались сейсмоионосферные эффекты от землетрясений с магнитудами $5 < M \leq 6$, для которых в среднем наблюдается увеличение $foF2_{norm}$ на (-5,-4) дни и уменьшение на (-1) день (см. рис.2).

Введем параметр $\Delta R = R - R_D$. Если станция лежит внутри области подготовки, расстояние ΔR отрицательно, если станция ВЗ лежит вне области подготовки, расстояние ΔR положительно. Рассмотрим зависимость эффекта от расстояния ΔR в (-5,-4) дни. Каждое землетрясение характеризуется величиной, равной $\Delta R = R - \exp(M)$ по оси ОХ и двумя значениями $foF2_{norm}(-5)$, $foF2_{norm}(-4)$ по оси ОУ, каждому дню соответствует звездочка, поскольку было естественно предположить, что длительность эффекта составляет двое суток.

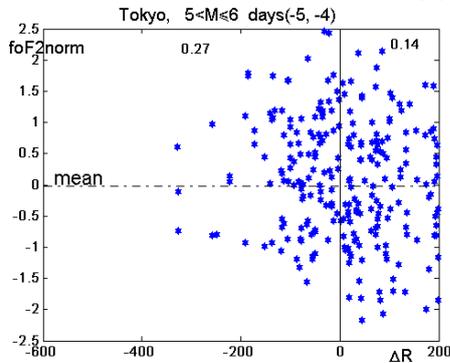


Рис. 3. Зависимость $foF2_{norm}$ от ΔR для землетрясений $5 \leq M < 6$ на (-1) ден.

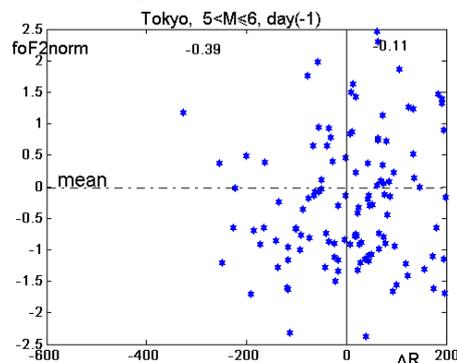


Рис.4. Зависимость $foF2_{norm}$ от ΔR для землетрясений $5 \leq M < 6$ на (-5,-4) дни.

При $\Delta R < 0$ (станция расположена внутри области подготовки) наблюдаются увеличение $foF2_{norm}$ на (-5,-4) и значимое уменьшение на (-1) дни. При $\Delta R > 0$ (станция ВЗ расположена вне области подготовки) эффект незначимый.

Перейдем к исследованию сейсмоионосферных эффектов для землетрясений на Камчатке. В окрестности ст. «Петропавловск-Камчатский» за время работы станции сильных землетрясений с магнитудой $M > 6$ было мало, для землетрясений с магнитудами $5 < M < 5.5$ эффект незначимый, поэтому для статистического анализа использованы события с магнитудами $M > 5.5$. При наложении эпох получено, что $foF2_{norm}$ в среднем увеличивается а (-5,-4,-3) дни, уменьшение во временной окрестности (0) дня незначимое.

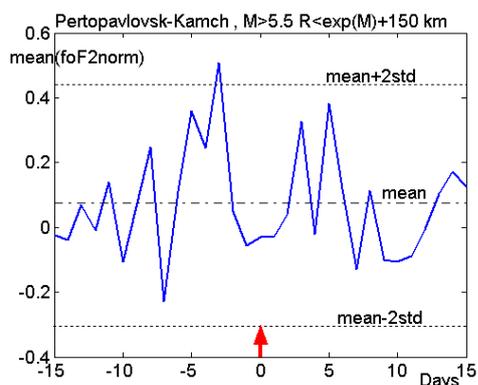


Рис. 5 Результаты наложения эпох $foF2_{norm}$ для землетрясений с $M > 5.5$

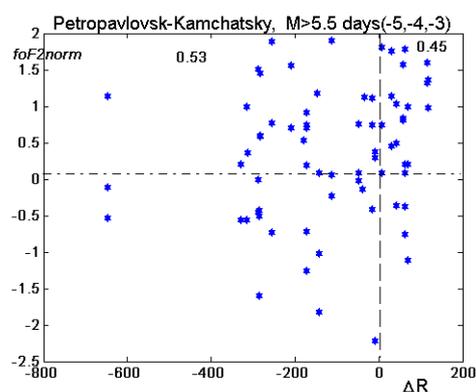


Рис. 6. Зависимость $foF2_{norm}$ от ΔR на (-5,-4,-3) дни

На Рис. 3 представлена зависимость $foF2_{norm}$ за (-5,-4) дни от расстояния ΔR . Увеличение $foF2_{norm}$ на (-5,-4) дни наблюдается на расстояниях как меньше радиуса области подготовки R_D (среднее значение $foF2_{norm}$ равно 0.53), так и в кольце шириной 150 км вне этой области (среднее значение $foF2_{norm}$ равно 0.45).

Теперь обратимся к исследованию сейсмоионосферных эффектов в ходе $foF2$ по данным ст. Ташкент. В окрестности Ташкента мало сильных землетрясений, поэтому рассмотрим события с $M > 5$, $R < 1500$ км.

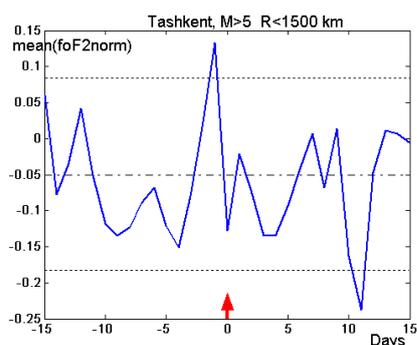


Рис. 7. Результаты наложения эпох $foF2_{norm}$ для землетрясений, $M > 5.0$

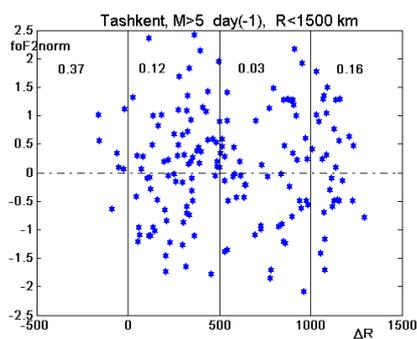


Рис. 8. Зависимость $foF2_{norm}$ от ΔR на (-1) день

При наложении эпох получается, что на (-1) день в среднем имеет место увеличение $foF2_{norm}$, причем оно наблюдается на расстояниях меньше радиуса области подготовки R_D (среднее значение $foF2_{norm}(-1)$ равно 0.37), на больших расстояниях увеличение незначимое.

Выводы

1. По материалам ионосферных станций Токио и Ташкент получено, что для землетрясений с магнитудами $5 < M \leq 6$ сейсмоионосферные эффекты в $foF2$ статистически имеют место в пределах области подготовки по Добровольскому $R_D = \exp(M)$ км, при этом статистически достоверно увеличение $foF2$ за 3-5 суток до землетрясения.

2. В окрестности ст. Петропавловск-Камчатский для землетрясений с магнитудами $M > 5.5$ статистически имеет место увеличение $foF2$ на (-5,-4,-3) дни на расстояниях примерно до $R_D + 150$ км.

3. Таким образом, для не очень сильных землетрясений предвестник проявляется, если станция наблюдения расположена в пределах области подготовки по Добровольскому. По-видимому, ответственной за возникновения сейсмоионосферного эффекта является кора в ближайшей окрестности станции, а не процессы в эпицентре будущего землетрясения. Отметим, что эпицентры большей части землетрясений в окрестности Токио и Петропавловска расположены в океане.

Литература

1. *Fatkullin M. N., Zelenova T. I., Legenka A. D.* On the ionospheric effects of asthenospheric earthquakes// *Phys. Earth and Planet. Inter.* 1989. Vol. 57, № 1/2. P. 82-85.
2. *Липеровский В. А., Похотелов О. А., Шалимов С. Л.* Ионосферные предвестники землетрясений. М.: Наука, 1992. 304 с.
3. *Hobara Y., Parrot M.* Ionospheric perturbations linked to a very powerful seismic event// *J. Atmos. Terr. Phys.* 2005. V. 67, P. 677-685.
4. *Liu J.Y., Chen Y.I., Chuo Y.J., Chen C.S.*, A statistical investigation of preearthquake ionospheric anomaly// *J. Geophys. Res.*, 111, A05304, doi:10.1029/2006.
5. *Rios V.H., Kim V.P., Hegai V.V.* Abnormal perturbations in the F2 region ionosphere observed prior to the great San Juan earthquake of 23 November 1977// *Adv.Space Res.* 2004. V.33. P.323-327.
6. *Singh B., Kushwah V., Singh O.P., Lakshmi D.R., Reddy B.M.* Ionospheric perturbations caused by some major earthquakes in India// *Physics and Chemistry of the Earth.* 2004. V.29. P.537-550.
7. *Liperovskaya E. V., Parrot M., Bogdanov V. V., Meister C.-V., Rodkin M. V., and Liperovsky V. A.* On variations of foF2 and F-spread before strong earthquakes in Japan// *Nat. Hazard Earth Syst. Sci.*, 2006. №6 P.735-739.
8. *Liperovskaya E.V., Bogdanov V.V., Biagi P.-F., Meister C.-V., Liperovsky V.A., Rodkin M.V.* Day-time variations of foF2 connected to strong earthquakes// *Nat. Hazard Earth Syst. Sci.*, 2009. V.9. P.53-59.
9. *Pulinets S.A. and Boyarchuk K.A.*: Ionospheric precursors of earthquakes, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2004.
10. *Добровольский И.П.* Математическая теория подготовки и прогноза тектонического землетрясения. М.:Физматлит, 2009. 236с.
11. *Липеровская Е.В., Богданов В.В., Родкин М.В., Мейстер К.-В., Силина А.С., Мандрикова О.В.* Статистический анализ возмущений критической частоты foF2 ионосферы за несколько суток до и после землетрясений по материалам станций «Петропавловск-Камчатский» и «Токио»// Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений: IV междунар. конф., с. Паратунка Камч. обл., 14–17 авг. 2007 г.: сб. докл. – Петропавловск-Камч.: ИКИР ДВО РАН, 2007. С. 378-384.