

Крупномасштабные возмущения полного электронного содержания ионосферы южно-американского региона накануне мощных чилийских землетрясений 2010 и 2014 гг.

Л.М. Ишкова, Ю.Я. Ружин, И.Н. Бершадская

ФГБУН Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова Российской академии наук, 108840, г. Москва, г. Троицк, Калужское шоссе, д. 4, ИЗМИРАН, ishkova@izmiran.ru

Представлены результаты анализа крупномасштабных пространственно-временных вариаций полного электронного содержания ионосферы (TEC) южно-американского региона накануне мощных чилийских землетрясений 27.02.2010 г. ($M=8.8$) и 01.04.2014 г. ($M=8.2$). Исследовано развитие в спокойных геомагнитных условиях аномальных возмущений в суточном ходе величин TEC в протяженных областях ионосферы. Сделан вывод о сходном выраженном характере реакции южно-американской ионосферы на сейсмические процессы в Андийской сейсмической зоне в рассмотренные периоды. Отмечено соответствие характера вариаций величин δTEC пространственно-временной картине сейсмической активности в Андийской сейсмической зоне.

The analysis results of the large-scale space-time variations of the total electron content (TEC) in the South American ionosphere before the powerful Chilean earthquakes in February 27, 2010 ($M = 8.8$) and in April 01, 2014 ($M = 8.2$) are presented. It was studied the development in quite geomagnetic conditions of the anomalous disturbances in the daily TEC in extended ionosphere regions. It was concluded that the reaction of the South American ionosphere to the seismic processes in the Andean seismic zone was similar in these periods. The correspondence of δTEC variations to the space-time pattern of the seismic activity in the Andean seismic zone was noted.

Введение

Ионосферные явления, связанные с сейсмической активностью, обсуждаются уже почти 30 лет. К их числу относятся исследования электромагнитных явлений, которые наблюдались до и после мощных землетрясений, [1-3] и работы по обнаружению ионосферных предвестников землетрясений [4-8].

Новые возможности в изучении пространственно-временных характеристик модификации ионосферы перед землетрясениями предоставляет использование глобальной навигационной системы GPS (Global Positioning System) [9-15]. GPS техника осуществляет измерения групповых и фазовых задержек радиосигналов $L1=1575$ МГц и $L2=1228$ МГц с 30-секундным интервалом одновременно для всех спутников, находящихся в зоне радиовидимости для данной GPS станции. Анализ GPS наблюдений показал, что вариации полного электронного содержания ионосферы (TEC) очень чувствительны к изменению электронной концентрации области F2 и могут эффективно использоваться для обнаружения ионосферных предвестников землетрясений. Коэффициент корреляции между TEC и f_0F2 достигает величины 0,9. А поскольку электронная концентрация в максимуме слоя F2 является одним из наиболее чувствительных к сейсмической активности параметров ионосферы, мы можем использовать TEC данные для оценки пространственных масштабов и временной динамики сейсмоионосферных эффектов практически в любом сейсмоактивном регионе мира.

Большое количество работ посвящено исследованиям различными методами ионосферных аномалий накануне мощного чилийского землетрясения 27.02.2010 г., включая наземные и спутниковые измерения [12-17]. В работах [12, 13] впервые обнаружены импульсные всплески TEC, а также аномальная грозная активность за 20

минут до главного толчка, способствовавшая хаотичным всплескам ТЕС в ионосфере как в пространстве, так во времени в зоне подготовки землетрясения. В работе [14] получены предварительные результаты исследований крупномасштабных вариаций ТЕС ионосферы южно-американского региона по данным сети станций GPS накануне мощного чилийского землетрясения 27.02.2010 г., которые свидетельствовали о выраженной реакции ионосферы на сейсмические процессы в Андийской зоне.

В данной работе представлены результаты анализа по данным сети станций GPS пространственно-временных вариаций ТЕС южно-американского региона накануне мощных чилийских землетрясений 27.02.2010 г.(M=8.8) и 01.04.2014 г. (M=8.2). Как будет показано ниже, использование данных GPS позволило авторам детально исследовать пространственно-временную динамику развития аномальных возмущений электронной концентрации ионосферы сейсмогенного характера накануне подготовки землетрясений.

Исходные данные

Проанализирован характер суточных вариаций величин ТЕС в периоды 17-27.02.2010 г. и 25.03-03.04.2014 г. по отношению к соответствующим для данного часа местного времени суток (временной интервал $\Delta t=2$ час) десятидневным медианам (величины $\delta T E S$, %) в долготных секторах $-30^{\circ} \div -105^{\circ} (\Delta \lambda=15^{\circ})$ и в диапазоне широт $20^{\circ} \div -60^{\circ} (\Delta \varphi=5^{\circ})$. Исследовано развитие в спокойных геомагнитных условиях на фоне сейсмической активности в регионе аномальных возмущений величин ТЕС в протяженных областях ионосферы.

Вторая половина февраля 2010г. характеризовалась рядом землетрясений умеренной интенсивности в Андийской сейсмической зоне, в том числе в эпицентральной области чилийского землетрясения. Особенно интенсивная форшоковая активность отмечалась в зоне подготовки землетрясения с $M=6.3$, произошедшего 27 февраля (1545UT, $\varphi=-24.87^{\circ}$ $\lambda=-65.60^{\circ}$) в 1300 км севернее эпицентра чилийского землетрясения спустя несколько часов после его главного удара.

В третьей декаде марта 2014 г., накануне мощного землетрясения 01.04.2014 г., имела место интенсивная форшоковая активность, в том числе с магнитудами $M \geq 5.0$, практически в эпицентре главного удара. Кроме того, происходили отдельные события вдоль Андийской зоны и на севере Южной Америки.

В Таблице 1 приведена информация о параметрах этих чилийских землетрясений, а также информация о некоторых событиях, в том числе одиночных, вызывавших возмущения ПЭС в рассмотренные периоды. Треугольниками в Таблице 1 отмечены эпицентры главных ударов в областях землетрясений в Андийской сейсмической зоне.

Таблица 1. Параметры чилийских землетрясений 2010 и 2014 гг.

Дата	Время, UT	$\varphi,^{\circ}$	$\lambda,^{\circ}$	h, км ^o	Магнитуда
23.02.2010	1031	-57.69	-66.11	35	4.8
27.02.2010	0634	-36.12	-72.9	22	8.8 Δ
27.02.2010	1545	-24.87	-65.6	10	6.3 Δ
27.02.2010	1954	10.84	-43.41	10.0	5.8
28.02.2010	1026	-1.18	-80.39	35	5.2 Δ
27.03.2014	2350	-29.1	-68.7	10.0	5.7 Δ
31.03.2014	1458	-34.7	-71.6	44.4	4.8
01.04.2014	2346	-19.6	-70.7	25.0	8.2 Δ

Результаты анализа

Анализ распределения максимальных за сутки величин δ ТЕС (положительных или отрицательных) в указанной широтно-долготной сетке позволил сделать вывод о сходном выраженном характере реакции южно-американской ионосферы на процессы подготовки указанных землетрясений в регионе в рассмотренные периоды и о соответствии характера вариаций δ ТЕС пространственно-временной картине сейсмической активности в Андийской сейсмической зоне.

Характерные особенности аномальных возмущений ТЕС ионосферы накануне рассмотренных событий заключались в развитии сильных положительных возмущений (от 30 до 50÷60% и выше) относительно медианного уровня, на расстояниях до нескольких тысяч километров за несколько суток до главного удара и в смене положительной фазы возмущений отрицательной фазой за 3-4 дня до главного удара.

Отметим, что радиусы зон подготовки землетрясений с магнитудами 8.8 и 8.2 в соответствии с формулой Добровольского могли достигать 6600 и 3600 км соответственно.

Отрицательные возмущения ТЕС в апреле 2014 г. (до -30÷ -40%) имели место и на следующий день после главного удара (выборка данных GPS в феврале 2010 г. была ранее произведена по 27 февраля включительно).

В Таблицах 2 и 3 представлена информация о пространственном распределении максимальных в суточном ходе величинах δ ТЕС за 22, 27 февраля 2010 г. и 27 марта, 1 апреля 2014 г. в области широт $0 \div -50^\circ$.

Данные дни характеризуют развитые фазы положительных возмущений в указанной области широт и отрицательные возмущения ТЕС в периоды главных ударов землетрясений. В таблицах указаны также длительности возмущений в суточном ходе (в часах) и положения эпицентров землетрясений (Δ), приведенные в Таблице 1.

Максимальные протяженности областей ионосферы с положительными возмущениями ТЕС 22.02.2010 г. составляли 4500 км вдоль широты -25° и ~ 2700 км в меридиональном направлении. Протяженности областей с отрицательными возмущениями ТЕС 27.02.2010 г. составляли соответственно 2800 км на широте -30° и 2200 км вдоль меридиана.

27.03.2014 г. протяженности областей ионосферы с положительными возмущениями ТЕС достигали 7800 км вдоль широты -20° и ~ 5000 км в меридиональном направлении. Протяженности областей с отрицательными возмущениями ТЕС 01.04.2014 г. составляли ~ 4000 км на широте -35° и 2200 км вдоль меридиана.

Высокие значения величин δ ТЕС и большие длительности возмущений вблизи эпицентральной области землетрясения 01.04.2014 г. обуславливались интенсивной форшоковой активностью, в том числе с магнитудами $M \geq 5.0$, практически в эпицентре главного удара этого землетрясения.

Ранее, в работе [8], были представлены результаты анализа крупномасштабных вариаций критических частот слоя F2 по часовым данным шести станций вертикального зондирования ионосферы, расположенных вдоль Андийской сейсмической зоны, в период подготовки и начальной стадии развития катастрофического чилийского землетрясения 22.05.1960 г. (1911 UT, -39.5° , -74.5° , $M=8.5$). В работе было показано, что в рассмотренный период в спокойных геомагнитных условиях в низкоширотной области ионосферы имели место аномальные возмущения электронной концентрации, проявившиеся в сильных понижениях критических частот слоя F2 в ночные часы в период от 2 суток до нескольких часов после первого сильного форшока.

Таблица 2. Величины δT_{EC} ,% 22.02.2010 г. и 27.02.2010 г.

φ° λ°	22.02.2010						27.02.2010					
	-105	-90	-75	-60	-45	-30	-105	-90	-75	-60	-45	-30
0	25.9	28.0	1ч 31.7	≤ 1ч 37.5	1ч 54.7	22.4	-27.7	-18.1	-12.5	-16.6	-16.2	-18.7
-5	15.0	16.3	14.9	≤ 1ч 37.6	1ч 49.3	17.2	-26.7	-18.8	-17.9	-9.8	-17.5	-20.4
-10	19.5	1 4.0	8.7	14.1	≤ 1ч 30.6	-15.8	-23.9	-23.9	-22.6	-23.5	-29.1	-24.5
-15	18.7	12.2	5.0	17.1	20.2	25.8	-17.5	-19.3	-21.1	-25.8	-24.2	-24.9
-20	20.1	17.0	21.1	≤ 1ч 33.6	1ч 34.7	1ч 40.8	-26.0	-28.9	-25.2	Δ -20.3	-25.3	-26.8
-25	24.8	21.2	≤ 1ч 32.9	3ч 41.4	5ч 47.8	1ч 47.4	≤ 1ч -34.0	≤ 1ч -34.7	-26.5	-23.1	-23.7	-29.1
-30	23.6	22.1	29.0	2ч 42.1	≤ 1ч 38.0	≤ 1ч 40.3	≤ 1ч -34.7	~ 4ч -36.2	≤ 1ч -32.1	-25.4	-27.0	-24.8
-35	19.4	26.8	≤ 1ч 32.9	≤ 1ч 35.7	23.1	21.5	≤ 1ч -34.6	~ 2ч -46.9	2ч Δ -33.3	-24.3	≤ 1ч -32.6	-25.8
-40	≤ 1ч 34.6	≤ 1ч 36.1	≤ 1ч 31.3	1ч 38.7	19.5	11.3	-29.0	1ч -38.2	≤ 1ч -31.6	-20.8	-26.2	-23.6
-45	≤ 1ч 31.7	4ч 36.7	≤ 1ч 36.0	1ч 36.0	16.1	-12.1	-22.9	≤ 1ч -30.0	-28.5	-13.1	-15.9	11.5
-50	22.6	29.2	≤ 1ч 31.8	18.9	10.5	9.7	-15.0	-20.4	-20.1	-12.4	-11.2	14.4

Таблица 3. Величины δT_{EC} ,% 27.03.2014 г. и 01.04.2014 г.

φ° λ°	27.03.2014						01.04.2014					
	-105	-90	-75	-60	-45	-30	-105	-90	-75	-60	-45	-30
0	12.4	-16.3	3ч 36.7	3ч 47.5	1ч 50.6	14.4	-13.8	-24.6	2ч -37.2	-29.8	19.4	-10.8
-5	12.0	11.2	2ч 36.4	3ч 47.4	2ч 63.4	14.3	-12.9	17.9	-21.2	29.6	20.5	-16.4
-10	25.0	15.7	≤ 1ч 36.1	3ч 54.6	2ч 63.1	18.8	20.2	≤ 1ч 39.6	≤ 1ч 58.0	≤ 1ч 52.9	-29.1	-24.6
-15	3ч 45.7	4ч 42.3+	2ч 62.3	4ч 70.3	2ч 52.2	29.2	-13.9	16.1	26.6	22.3+	≤ 1ч -32.4	-20.4
-20	5ч 60.9	6ч 72.2	5ч 83.2	5ч 106.8	3ч 55.1	≥ 3ч 53.6	-22.9	-17.5	Δ -26.8	-23.6	≤ 1ч -30.4	-23.6
-25	5ч 60.8	6ч 84.6	7ч 81.0	6ч 111.0	5ч 59.8	≥ 2ч 70.3	-22.0	-24.3	1ч -32.1	2ч -30.4	1ч -33.8	-18.6
-30	4ч 56.1	4ч 69.2+	8ч Δ 72.6	3ч 67.6	≤ 1ч 39.1	≥ 2ч 65.3	-21.9	-25.3	1ч -32.8	2ч -31.4	≤ 1ч -35.2	-23.3
-35	3ч 53.9+	4ч 43.6	2ч 60.3	3ч 60.3	1ч 38.9	29.	-17.4	≤ 1ч -31.2	≤ 1ч -32.4	≤ 1ч -31.8	≤ 1ч -32.4	25.6+
-40	3ч 48.5+	3ч 45.6	1ч 49.6	2ч 78.2+	3ч 36.2	28.0	-14.7	-16.0	-11.5	-26.6	-13.2	-10.6
-45	3ч 46.2+	3ч 46.1	2ч 40.0	1ч 53.0	26.0	15.7	-11.4	-8.7	22.8	-25.0	-16.8	-14.5
-50	1ч 39.5	2ч 34.3	29.5	25.4	15.6	12.9	-11.6	-12.9	27.9	-25.3	-17.7	-13.7

Отрицательные возмущения в foF2 предварялись положительной фазой (за 3 суток на среднеширотной станции Тукуман, находившейся на расстоянии 1500 км от эпицентра), амплитуда и время появления которой были различны на разных станциях.

Был сделан вывод о возникновении в рассмотренный период сейсмогенных возмущений в экваториальной ионосфере, обусловленных удаленным очагом землетрясения (3700 км). Генерацию возмущений Ne в такой протяженной области могло обеспечить [2] проникновение электростатических электрических полей в ионосферу от крупномасштабного приземного источника, как в самой эпицентральной области, так и фрагментарное их проникновение вдоль активизировавшейся части сейсмофокальной зоны южно-американского континента под влиянием деформационных волн от источника тектонического напряжения.

Заключение

Сделан вывод о сходном выраженном характере реакции ионосферы южно-американского региона на сейсмические процессы накануне мощных землетрясений 20.02.2010 г. и 01.04.2014 г.

Характерные особенности аномальных возмущений TEC ионосферы накануне землетрясений заключались в развитии сильных положительных возмущений от 30 до 50÷60% и выше относительно медианного уровня на расстояниях до нескольких тысяч километров за несколько суток до главного удара и в смене положительной фазы возмущений отрицательной фазой за 3-4 дня до главных ударов.

Отмечено соответствие характера вариаций величин δ TEC пространственно-временной картине сейсмической активности вдоль Андийской сейсмической зоны в рассмотренные периоды.

Использование данных GPS с достаточным пространственно-временным разрешением позволило детально исследовать пространственно-временную динамику развития аномальных возмущений TEC сейсмогенного характера в протяженных областях ионосферы южно-американского континента.

Литература

1. Warwick J. W., C. Stoker, and T. R. Meyer. (1982). Radio emission associated with rock fracture: possible application to the great Chilean Earthquake of May 22, 1960. //Journal of Geophysical Research. V. 87. N. 4. P. 2851–2859.
2. Моргунов В.А. (1988). К природе литосферно-ионосферных связей. //Известия АН СССР. Физика Земли. № 5. С. 80-87.
3. Гохберг М.Б., В.А. Моргунов, О.А. Похотелов. (1988). Сейсмoeлектромагнитные явления. М. : Наука. 174 с.
4. Липеровский В.А., Похотелов О.А., Шалимов С.А. (1992). Ионосферные предвестники землетрясений. М.: Наука.. 304 с.
5. Oraevsky V.N., Ruzhin Yu.Ya., Depueva A.Kh. (1994). Seismo-ionospheric precursors and atmospheric electricity. //Turk. J. of Physics. V. 18. № 11. P. 1229-1234.
6. Ruzhin Yu.Ya, Depueva A.Kh. (1996). Seismoprecursors in space as plasma and wave anomalies. //Journ. Atmospheric Electricity. V. 16. N. 3. P. 271-288.
7. Hayakawa M. (Eds.). (1999). Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes. /Terra Scientific Publishing Company. Tokyo. Japan. 996 p.
8. Ишкова Л.М., В.А. Моргунов. (2000). Сейсмогенные возмущений в ионосфере, предшествовавшие Чилийской катастрофе 1960 г. /Электрическое взаимодействие геосферных оболочек. М.: ОИФЗ РАН. С. 122-126.

9. Oraevsky V.N., Ruzhin Yu.Ya., Shagimuratov I.I. (2000). Anomalies of ionospheric TEC above Turkey before two strong earthquakes at 1999. /Proceed. 15th Wroclaw EMC Symposium. P. 215-218.
10. Ruzhin, Yu.Ya., Oraevsky V.N., Shagimuratov I.I. and Sinelnikov V.M. (2002). Ionospheric precursors of earthquakes revealed from GPS data and their connection with “sea-land” boundary. /Proceed. 16th Wroclaw EMC Symposium. P. 723-726.
11. Liu J.Y., Chuo Y.J., Shan S.J., Tsai Y.B., Chen Y.I., Pulinetz S.A., Yu S.B. (2004). Pre-earthquake ionospheric anomalies registered by continuous GPS TEC measurement. /Annales Geophysicae. V. 22. P. 1585-1593.
12. Ружин Ю.Я., Смирнов В.М., Смирнова Е.В. (2016). Импульсные аномалии ТЕС ионосферы перед мощным землетрясением в Чили (27 февраля 2010 г.). /Материалы VII Всероссийской научной конференции. Муром. С. 118-125.
13. Ruzhin Yu.Ya., Smirnov V.M. Pulsed TEC during 20 minutes before the Chile earthquake. (2016). /Handbook: The 2nd International Workshop of CSES Mission. Beijing. China. С. 26-30.
14. Ишкова Л.М., Ю.Я. Ружин, И.Н. Бершадская. Вариации полного электронного содержания ионосферы накануне мощного чилийского землетрясения 2010 г. /XI ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе». 15-19 февраля 2016 г. Москва. ИКИ РАН. Сб. тезисов. С. 222.
15. Zhang, X., Shen, X., Zhao, S., Yao, L., Ouyang, X., and Qian, J. (2014). The characteristics of quasistatic electric field perturbations observed by DEMETER satellite before large earthquakes. //J. Asian Earth Sci. V. 79. P. 42–52.
16. Silvana Spagnotto, Enrique Triep, Laura Giambiagi, Marianela Lupari. (2015). Triggered seismicity in the Andean arc region via static stress variation by the MW = 8.8, February 27, 2010, Maule earthquake. //Journal of South American Earth Sciences. V. 63. P. 36-47.
17. Akhoondzadeh, M. (2015). Ant Colony Optimization detects anomalous aerosol variations associated with the Chile earthquake of 27 February 2010. //Adv. Space Res. 55. С. 1754–1763.