

УДК 550.510.533

Ю.В. Романовская, А.А. Намгаладзе

Ионосферные предвестники землетрясений: анализ измерений полного электронного содержания перед сильными сейсмическими событиями 2005 года

Yu.V. Romanovskaya, A.A. Namgaladze

Ionospheric earthquake precursors: Analysis of total electron content measurements before strong seismic events of the year 2005

Аннотация. Представлены региональные карты относительных возмущений полного электронного содержания ионосферы перед сильными сейсмическими событиями 2005 г., построенные с использованием данных спутников системы глобального позиционирования (GPS). Проведен анализ этих карт, в результате которого выделены аномальные вариации полного электронного содержания ионосферы, отвечающие критериям, предъявляемым к ионосферным предвестникам землетрясений, и определены характерные особенности таких предвестников.

Abstract. The work presents regional maps of total electron content relative disturbances before strong seismic events of the year 2005. The maps were plotted using the Global Positioning System (GPS) data. These maps' analysis has been carried out, as a result anomalous total electron content variations which meet the criteria for ionospheric earthquake precursors have been distinguished. The characteristic features of the precursors have been determined.

Ключевые слова: ионосферные предвестники землетрясений, полное электронное содержание ионосферы, электромагнитный дрейф плазмы

Key words: ionospheric earthquake precursors, total electron content of ionosphere, electromagnetic plasma drift

1. Введение

В настоящее время актуальной является проблема разработки методики достоверного прогноза магнитуды предстоящего сильного землетрясения, местоположения эпицентра и диапазона времени, в которое произойдет событие. Передовая система раннего предупреждения о землетрясениях, применяемая в Японии и основанная на регистрации первых толчков, рассчитывает положение эпицентра, магнитуду и посылает предупреждение о сильном событии от нескольких секунд до одной-двух минут до начала землетрясения (*Horiuchi et al., 2005*), чего явно недостаточно для полноценного реагирования.

Прогнозы землетрясений делятся на долгосрочные, среднесрочные и краткосрочные в зависимости от методов, точности и целей прогнозирования. Долговременный прогноз основывается большей частью на анализе исторических данных по сейсмической активности и используется для определения вероятности появления землетрясений в последующие годы и десятилетия. При составлении среднесрочных прогнозов (время ожидания – месяцы и годы) применяется большой объем данных сейсмологических и геодезических наблюдений последних лет. Наиболее востребованными с точки зрения предотвращения человеческих потерь и снижения материального ущерба при сильных землетрясениях являются краткосрочные прогнозы с временными шкалами порядка часов, суток и недель.

Очевидно, что для краткосрочных предварительных прогнозов требуются детерминированные достоверные предвестники, проявляющиеся за несколько часов или суток до предстоящего события. Поэтому в настоящее время много внимания уделяется исследованию ионосферных предвестников землетрясений, регистрируемых в полном электронном содержании ионосферы. Понимание механизма формирования этих предвестников, а также установление особенностей их проявления в пространстве и времени позволит дополнить существующие методики прогнозирования землетрясений новыми возможностями.

В настоящей статье проведен анализ наблюдавшихся спутниками системы глобального позиционирования возмущений полного электронного содержания перед сильными сейсмическими событиями 2005 г. с целью обнаружения ионосферных предвестников землетрясений, что позволит в дальнейшем выработать четкие детерминированные критерии по идентификации аномальных вариаций полного электронного содержания как ионосферных предвестников землетрясения. Данная работа

является продолжением исследования, результаты которого приведены в статьях (Namgaladze et al., 2012; Romanovskaya et al., 2012).

2. Ионосферные предвестники землетрясений

В периоды, предшествующие сильным сейсмическим событиям, регистрируются возмущения ионосферы над эпицентральной областью. Многочисленные наземные и спутниковые наблюдения показали, что перед сейсмическими событиями изменяется (возрастает или убывает) электронная концентрация E- и F-областей ионосферы над областью эпицентра.

Впервые отклик ионосферы на процессы подготовки к сильному землетрясению был описан в работах (Moore, 1964; Davies, Baker, 1965; Leonard, Barnes, 1965), посвященных анализу данных вертикального зондирования ионосферы. Вертикальное зондирование является достаточно простым и надежным методом наблюдений, однако позволяет судить о поведении среды исключительно над ионозондом.

В процессе совершенствования экспериментальных методов наблюдений за состоянием ионосферы стало возможным зондирование ионосферы со спутников. Наблюдавшиеся перед землетрясениями наземными и спутниковыми ионозондами аномальные вариации критических частот, характеризующих максимальные значения концентрации электронов в ионосферных слоях, обсуждались в работах (Bošková et al., 1994; Hayakawa et al., 2000; Depueva, Rotanova, 2000; Liperovskaya et al., 2006; Depueva et al., 2007) и др. В настоящее время при широком распространении спутников систем глобального позиционирования GPS/ГЛОНАСС и создании огромной сети приемников стали доступны данные по глобальному распределению полного электронного содержания ионосферы. Они не только позволяют судить о поведении ионосферы вблизи эпицентральной точки, но и представляют глобальную картину изменений полного электронного содержания в период, предшествующий сильным сейсмическим событиям. Так, в результате анализа данных спутников GPS были сделаны выводы об аномальных изменениях полного электронного содержания в период от 1 до 15 дней перед землетрясениями в области эпицентра и/или магнитно-сопряженной области (Afraimovich et al., 2004; Pulnits et al., 2005; Zakharenkova et al., 2007; Lin, 2011 и др.).

В качестве наиболее вероятного физического механизма формирования таких аномалий был назван вертикальный электромагнитный $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ дрейф плазмы F2-области, вызванный электрическим полем сейсмического происхождения, который изменяет концентрацию электронов над эпицентральной областью и в магнитно-сопряженной зоне в силу эквипотенциальности силовых линий магнитного поля Земли (Namgaladze et al., 2009). Эта гипотеза была подтверждена результатами целого ряда численных экспериментов с использованием глобальной численной модели верхней атмосферы Земли UAM (Zolotov et al., 2012; Karpov et al., 2012; 2013 и др.).

3. Метод обработки данных наблюдений

Данные наблюдений за полным электронным содержанием ионосферы (Total Electron Content, TEC) находятся в свободном доступе на сайте Национального управления по воздухоплаванию и исследованию космического пространства (National Aeronautics and Space Administration, NASA), URL: <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/ionex>. Отметим, что изображения и видеоматериалы, получаемые NASA и его подразделениями, публикуются как общественное достояние и могут свободно копироваться.

На сайте NASA размещен каталог данных по полному электронному содержанию с разрешением 5° по долготе, 2.5° по широте и временным интервалом 2 часа – так называемые глобальные карты полного электронного содержания ионосферы (Dow et al., 2009).

При проведении настоящего исследования для каждого двухчасового интервала каждых суток года рассчитывалось отклонение полного электронного содержания ионосферы от фоновых значений. Проблема нахождения фоновых значений до сих пор не имеет общепринятого решения. В некоторых исследованиях за фоновые значения берутся результаты расчетов по эмпирическим моделям ионосферы (Zakharenkova et al., 2008), в других – анализируются не возмущения, а абсолютные значения полного электронного содержания (Klimenko et al., 2011). Медианы за 15 суток использовались в работе (Zhao et al., 2010). Исследование зависимости результатов расчетов относительных возмущений полного электронного содержания ионосферы от ширины окна сглаживания проводилось в статье (Zolotov et al., 2013). В настоящей работе в качестве фона используется скользящее среднее за 7 предшествующих суток.

Возмущения полного электронного содержания (в %) рассчитываются по формуле

$$\text{Diff} = (\text{TEC}(\text{текущее}) - \text{TEC}(\text{фоновое})) / \text{TEC}(\text{фоновое}) \cdot 100 \%$$

4. Выборка событий

На сайте геологической службы США (URL: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/>) в свободном доступе находится список землетрясений, зарегистрированных с 1990 г. по сегодняшний день. В нем указаны магнитуда, момент начала каждого землетрясения в универсальном и местном времени, положение эпицентра, глубина залегания гипоцентра и другие параметры.

В ходе поиска ионосферных предвестников землетрясений отобраны сейсмические события 2005 г. магнитудой $M \geq 6$, с глубиной залегания гипоцентра $D \leq 80$ км и геомагнитной широтой эпицентра не больше 50° . Последнее было сделано для исключения влияния высокоширотных явлений на картину предвестников.

Всего по этим критериям выбрано 27 событий, список которых представлен в таблице.

Таблица. Сейсмические события 2005 г.

№ п/п	Дата	Местоположение	Магнитуда	Глубина залегания гипоцентра, км	Геомагнитные координаты	
					Широта, град.	Долгота, град.
1	16.01.05	Микронезия	6.6	9.9	1	210
2	19.02.05	Индонезия	6.5	10	-17	192
3	22.02.05	Иран	6.4	14	24	131
4	26.02.05	Индонезия	6.8	27.1	-8	166
5	20.03.05	Япония	6.6	10	23	198
6	28.03.05	Индонезия	8.6	30	-9	167
7	10.04.05	Индонезия	6.7	19	-13	169
8	11.04.05	Острова Лоялти	6.7	68	-27	245
9	14.05.05	Индонезия	6.8	34	-10	168
10	19.05.05	Индонезия	6.9	30	-9	167
11	14.06.05	Аляска (США)	6.8	51.7	46	237
12	15.06.05	Калифорния (США)	7.9	10	47	294
13	17.06.05	Калифорния (США)	6.7	10	46	295
14	02.07.05	Никарагуа	6.6	27	22	343
15	05.07.05	Индонезия	6.7	21	-9	167
16	23.07.05	Япония	6.0	65.6	25	207
17	24.07.05	Индия	7.3	16	-3	162
18	16.08.05	Япония	7.2	36	28	208
19	29.09.05	Папуа – Новая Гвинея	6.7	25	-13	223
20	08.10.05	Пакистан	7.6	26	25	147
21	19.10.05	Япония	6.3	41.5	26	207
22	14.11.05	Япония	7.0	11	28	211
23	19.11.05	Индонезия	6.5	30	-9	167
24	27.11.05	Иран	6.0	10	20	130
25	02.12.05	Япония	6.5	29	28	208
26	05.12.05	Конго, Танзания	6.8	22	-8	98
27	11.12.05	Папуа – Новая Гвинея	6.6	10	-15	223

5. Анализ результатов

Рассчитанные значения возмущений полного электронного содержания ионосферы представлены для отобранных событий в виде региональных геомагнитных карт с диапазоном широт от -70° до 70° и диапазоном долгот $\pm 30^\circ$ от геомагнитной долготы эпицентра землетрясения. Выбор широтного интервала обусловлен тем, что в высоких широтах наблюдаются возмущения ионосферы, связанные с геомагнитной активностью. Карты возмущений строились для 1-8 суток перед землетрясением.

Исходя из предположения об электромагнитном механизме формирования аномалий в полном электронном содержании, основными критериями, которым должны отвечать области повышенной (пониженной) электронной концентрации, чтобы считаться предвестниками, являются:

1) наличие областей относительного возмущения вблизи эпицентра и/или в магнитно-сопряженной области;

2) проявление этих областей преимущественно в ночные часы, так как при ионизации солнечным излучением в дневные часы области относительных возмущений, обусловленные

электромагнитным дрейфом, должны исчезать вследствие увеличения ионосферной проводимости и соответствующего ослабления электрического поля;

3) вытянутость областей вдоль геомагнитной параллели;

4) продолжительность существования указанных аномалий должна составлять не менее шести часов.

Анализ региональных карт возмущений полного электронного содержания ионосферы показал, что из 27 отобранных землетрясений 20 событий предварялись аномалиями, которые можно было бы охарактеризовать как предвестники. При этом перед 5 событиями наблюдались относительно слабые возмущения (не превышающие 30 %).

Региональные карты (в геомагнитных координатах) относительных возмущений полного электронного содержания ионосферы для различных событий представлены на рис. 1-5, на которых видны предвестники, отвечающие критериям, указанным выше. Звездочкой отмечено положение эпицентра землетрясения, ромбом – магнитно-сопряженная точка. Оранжевый кружок соответствует положению подсолнечной точки, черная кривая показывает линию терминатора. Метки местного времени (LT) в верхней части рисунков соответствуют положению эпицентра землетрясения.

Предвестники проявляются в виде пятен положительных относительных возмущений полного электронного содержания ионосферы, наблюдающихся над эпицентром и магнитно-сопряженной областью в течение шести и более часов после прихода вечернего терминатора (рис. 1). Эпицентр землетрясения в Микронезии (16 января) был расположен на экваторе, поэтому вместо двух пятен присутствует одно – над геомагнитным экватором. Перед событием в Папуа – Новой Гвинее (29 сентября) предвестники наблюдались два дня подряд, при этом форма областей относительных возмущений и их изменения во времени в разные дни были схожими. Рассматриваемые области относительных возмущений вытянуты вдоль геомагнитной параллели в среднем на 30° , при этом их протяженность вдоль геомагнитного меридиана составляет в среднем $10-15^\circ$.

Случаи возникновения отчетливых областей отрицательных относительных возмущений, наблюдавшихся перед сейсмическими событиями в Иране 22 февраля и в Индонезии 26 февраля, продемонстрированы на рис. 2. Общий фон на картах также отрицателен. Как и в случаях положительных возмущений, предвестники проявляются над эпицентром и магнитно-сопряженной областью, вытянуты вдоль параллели, а вдоль меридиана имеют размеры от 10 до $\sim 20^\circ$.

Карты относительных возмущений полного электронного содержания перед землетрясениями, произошедшими в разное время (19 мая, 5 июля и 19 ноября) в одной и той же области в Индонезии, представлены на рис. 3. Предвестники этих событий представляют собой области положительных относительных возмущений над эпицентром и магнитно-сопряженной точкой, почти не перемещающиеся вдоль геомагнитного меридиана. Области возмущений вытянуты вдоль геомагнитной параллели и имеют значительно большие зональные размеры, чем меридиональные. Магнитуда предвестников в ночные часы превышает величину возмущений в другое время суток. На картах присутствуют пятна положительных возмущений в дневные часы перед землетрясением 5 июля, отличающиеся формой и положением от типичных предвестников, проявившихся, например, в ночные часы за два дня до землетрясения 19 мая. Поэтому положительные возмущения в дневные часы перед событием 5 июля в Индонезии мы не можем отнести к типичным предвестникам в полном электронном содержании.

Положительные предвестники перед землетрясениями в Японии, отчетливо доминирующие только в одном полушарии – или над эпицентром (событие 23 июля), или в магнитно-сопряженной эпицентру области (событие 2 декабря), продемонстрированы на рис. 4. В магнитно-сопряженных к предвестникам областях возмущения слабы и не превышают 20 %. При этом области возмущений, как и в вышеописанных случаях, проявляются в ночные часы и имеют те же пространственные особенности. Возможно, асимметрия предвестников связана с сезонностью: пятна положительных относительных возмущений проявляются именно в зимнем полушарии, где концентрация электронов ниже, в то время как в летнем полушарии относительные возмущения незначительны.

Пример проявления ионосферных предвестников землетрясения на фоне повышенной геомагнитной активности перед сейсмическим событием 11 апреля вблизи островов Лоялти представлен на рис. 5. На картах отмечены значения индекса магнитной активности K_p , характеризующего планетарное возмущение геомагнитного поля. Основным признаком вариаций, связанных с геомагнитной активностью, является их перемещение от высоких широт к низким, тогда как предвестники землетрясений, обусловленные электромагнитным дрейфом плазмы под действием электрического поля сейсмогенного происхождения, практически статичны. Поэтому пятна возмущений высокой магнитуды, наблюдавшиеся в дневные часы, мы относим к проявлениям геомагнитной активности, а ионосферными предвестниками землетрясения считаем только положительные относительные возмущения, проявившиеся после прихода вечернего терминатора. Как и в описанных выше случаях, эти предвестники представляют собой вытянутые вдоль геомагнитной параллели области, зональный размер которых значительно превышает меридиональный, составляющий примерно 15° .

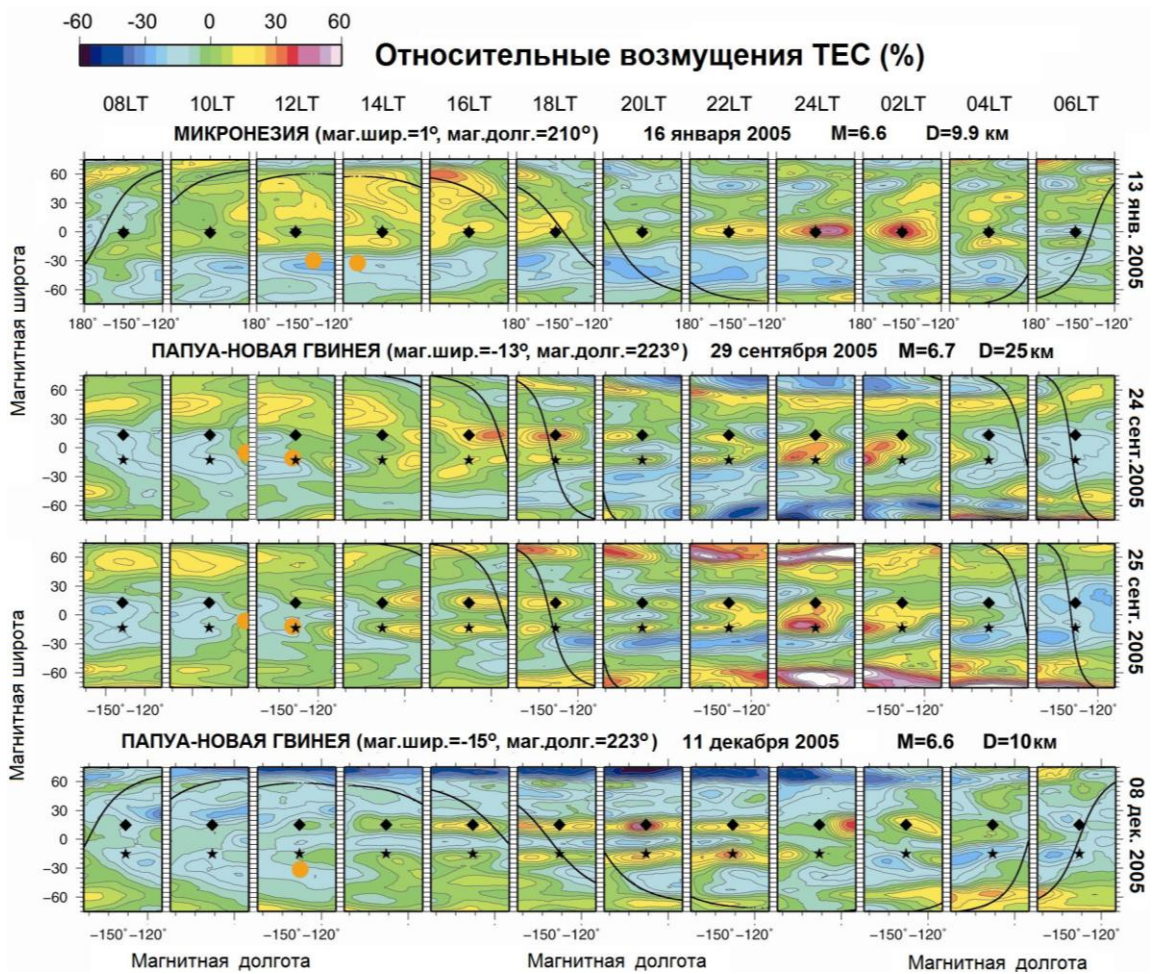


Рис. 1. Региональные геомагнитные карты отклонений значений полного электронного содержания ионосферы от фоновых вариаций (в %) перед сейсмическими событиями в Микронезии 16 января 2005 г., Папуа – Новой Гвинее 29 сентября и 11 декабря 2005 г.

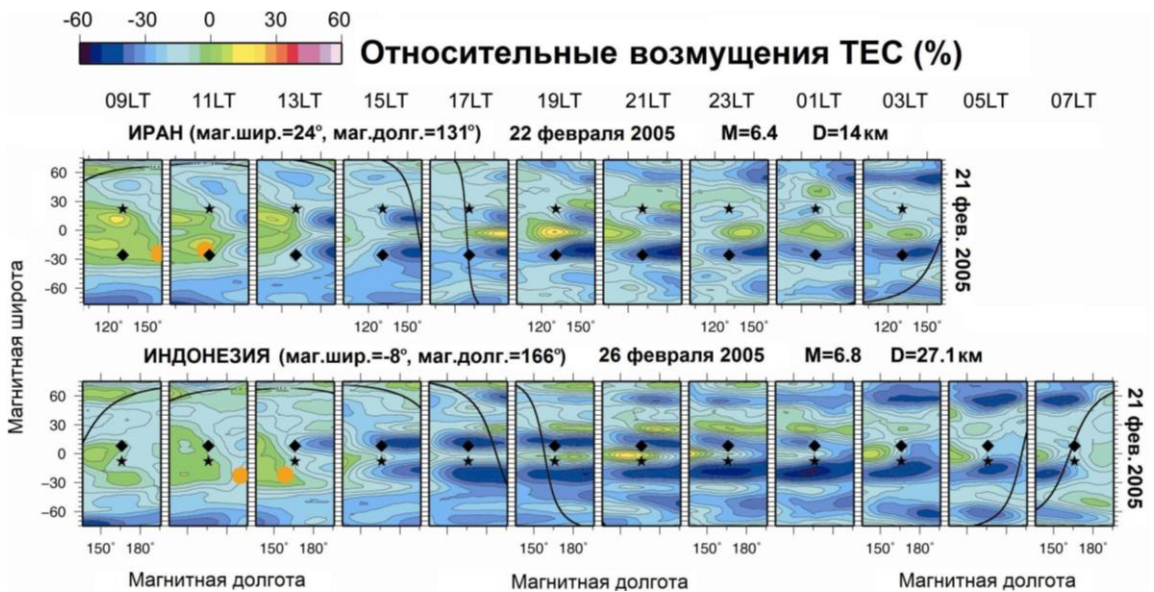


Рис. 2. Региональные геомагнитные карты отклонений значений полного электронного содержания ионосферы от фоновых вариаций (в %) перед сейсмическими событиями в Иране 22 февраля 2005 г. и Индонезии 26 февраля 2005 г.

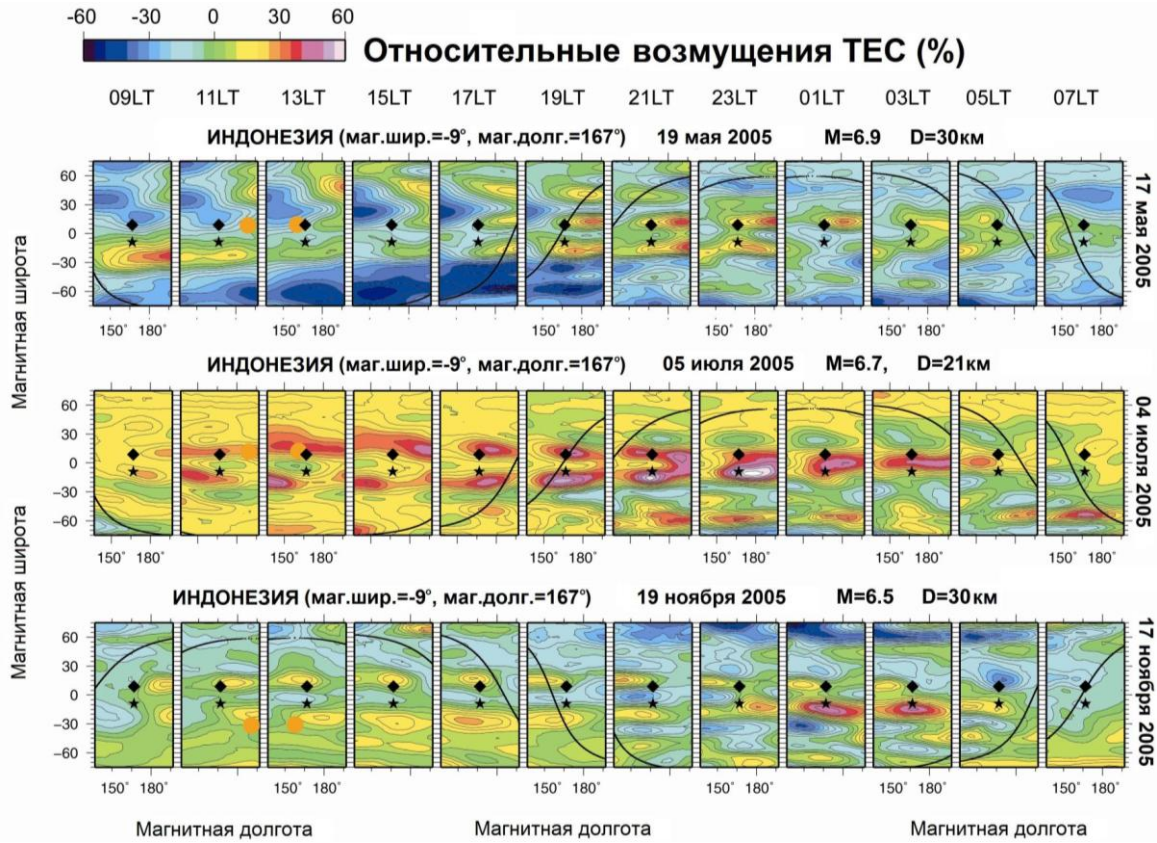


Рис. 3. Региональные геомагнитные карты отклонений значений полного электронного содержания ионосферы от фоновых вариаций (в %) перед сейсмическими событиями в Индонезии 19 мая, 5 июля и 19 ноября 2005 г.

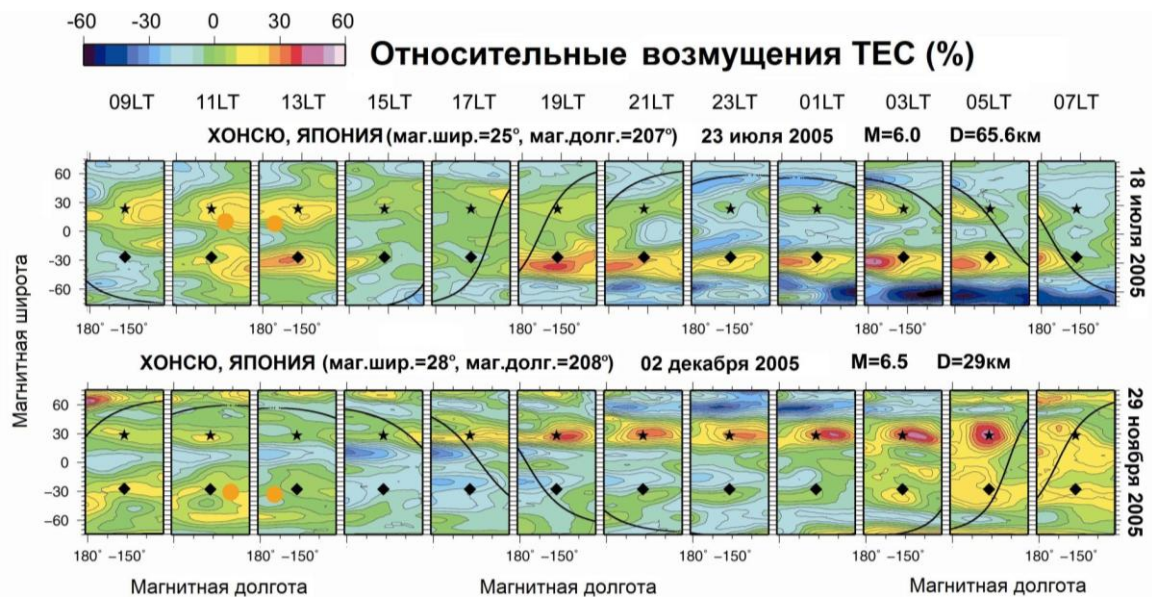


Рис. 4. Региональные геомагнитные карты отклонений значений полного электронного содержания ионосферы от фоновых вариаций (в %) перед сейсмическими событиями в Японии 23 июля и 2 декабря 2005 г.

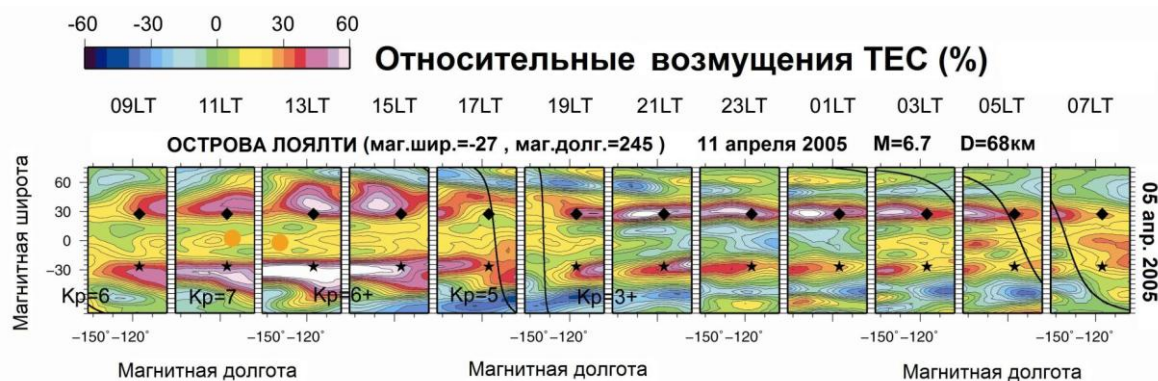


Рис. 5. Региональные геомагнитные карты отклонений значений полного электронного содержания ионосферы от фоновых вариаций (в %) перед землетрясением вблизи островов Лоялти 11 апреля 2005 г.

6. Заключение

Анализ региональных карт относительных возмущений полного электронного содержания, построенных для 1-8 суток перед сейсмическими событиями 2005 г. магнитудой не менее 6 и с глубиной залегания гипоцентра не более 100 км, показал, что критериям ионосферных предвестников отвечают локальные возмущения перед землетрясениями в количестве, составляющем ~75 % от общего числа событий (20 событий из 27). Перед 5 событиями из указанных 20 наблюдавшиеся возмущения были достаточно слабыми и имели магнитуду менее 30 %. Общими для всех выявленных предвестников землетрясений были следующие характеристики:

- 1) преобладание зонального размера над меридиональным, при этом типичный размер вдоль геомагнитного меридиана составляет примерно 15°;
- 2) практически отсутствие видимых перемещений предвестников в сравнении с динамикой перемещающихся ионосферных возмущений.

Типичным примером проявления ионосферных предвестников землетрясения можно считать положительные относительные возмущения полного электронного содержания ионосферы, наблюдавшиеся после прихода вечернего терминатора за 2 суток до события в Индонезии 19 мая 2005 г.

Благодарности. Авторы выражают свою признательность Борису Евгеньевичу Прохорову (Центр им. Гельмгольца, Центр исследования Земли, г. Потсдам, Германия; Университет г. Потсдам, Институт прикладной математики, Междисциплинарный центр динамики сложных систем, г. Потсдам, Германия) за помощь в обработке данных измерений полного электронного содержания ионосферы.

Литература

- Afraimovich E.L., Astafieva E.I., Gokhberg M.B., Lapshin V.M., Permyakova V.E., Steblov G.M., Shalimov S.L. Variations of the total electron content in the ionosphere from GPS data recorded during the Hector Mine earthquake of October 16, 1999, California. *Russian Journal of Earth Sciences*, v. 6, N 5, p. 339-354, 2004.
- Bošková J., Šmilauer J., Tříška P., Kudela K. Anomalous behaviour of plasma parameters as observed by the intercosmos 24 satellite prior to the Iranian earthquake of 20 June 1990. *Studia Geophysica et Geodetica*, v. 38, N 2, p. 213-220, doi:10.1007/BF02295915, 1994.
- Davies K., Baker D.M. Ionospheric effects observed around the time of the Alaskan earthquake of March 28, 1964. *Journal of Geophysical Research*, v. 70, N 9, p. 2251-2253, doi:10.1029/JZ070i009p02251, 1965.
- Depueva A.Kh., Mikhailov A.V., Devi M., Barbara A.K. Spatial and time variations in critical frequencies of the ionospheric F-region above the zone of equatorial earthquake preparation. *Geomagnetism and Aeronomy*, v. 47, Iss. 1, p. 129-133, doi: 10.1134/S0016793207010197, 2007.
- Depueva A.Kh., Rotanova N.M. Modification of the low-latitude and equatorial ionosphere before earthquakes. *Geomagnetism and Aeronomy*, v. 40, N 6, p. 728-732, 2000.
- Dow J.M., Neilan R.E., Rizos C. The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems. *Journal of Geodesy*, p. 191-198, doi: 10.1007/s00190-008-0300-3, 2009.
- Hayakawa M., Molchanov O.A., Kodama T., Afonin V.V., Akentieva O.A. Plasma density variations observed on a satellite possibly related to seismicity. *Advances in Space Research*, v. 26, N 8, p. 1277-1280, doi:10.1016/S0273-1177(99)01224-713, 2000.

- Horiuchi S., Negishi H., Abe K., Kamimura A., Fujinawa Y.** Automatic processing system for broadcasting earthquakes alarms. *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 95, p. 708-718, 2005.
- Karpov M.I., Namgaladze A.A., Zolotov O.V.** Modeling of total electron content disturbances caused by electric currents between the Earth and the ionosphere. *Russian Journal of Physical Chemistry*, v. 7, N 5, p. 594-598, doi: 10.1134/S19907931130501872013, 2013.
- Karpov M.I., Zolotov O.V., Namgaladze A.A.** Modeling of the ionosphere response on the earthquake preparation. *Proceedings of the MSTU*, v. 15, N 2, p.471-476, 2012.
- Klimenko M.V., Klimenko V.V., Zakharenkova I.E., Pulinets S.A., Zhao B., Tsidilina M.N.** Formation mechanism of great positive TEC 12 disturbances prior to Wenchuan earthquake on May 12, 2008. *Advances in Space Research*, v. 48, p. 488-499, doi:10.1016/j.asr.2011.03.040, 2011.
- Leonard R.S., Barnes R.A.** Observation of ionospheric disturbances following the Alaska earthquake. *Journal of Geophysical Research*, v. 70, p. 1250-1253, doi: 10.1029/JZ070i005p01250, 1965.
- Lin J.** Ionospheric total electron content anomalies due to Typhoon Nakri on 29 May 2008: A nonlinear principal component analysis. *Computers & Geosciences*, doi:10.1016/j.cageo.2011.12.007, 2011.
- Liperovskaya E.V., Parrot M., Bogdanov V.V., Meister C.-V., Rodkin M.V., Liperovsky V.A.** On variations of foF2 and F-spread before strong earthquakes in Japan. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 6, N 5, p.735-739, doi: 10.5194/nhess-6-735-2006, 2006.
- Moore G.W.** Magnetic disturbances preceding the 1964 Alaska earthquake. *Nature*, v. 203, Iss. 4944, p. 508-509, doi: 10.1038/203508b0, 1964.
- Namgaladze A.A., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Zakharenkova I.E.** Physical mechanism and mathematical modeling of earthquake ionospheric precursors registered in total electron content. *Geomagnetism and Aeronomy*, v. 49, N 2, p. 252-262, 2009.
- Namgaladze A.A., Zolotov O.V., Karpov M.I., Romanovskaya Yu.V.** Manifestations of the earthquake preparations in the ionosphere total electron content variations. *Natural Science*, v. 4(11), p. 848-855, doi: 10.4236/ns.2012.411113, 2012.
- Pulinets S.A., Leyva Contreras A., Bisiacchi-Giraldi G., Ciraolo L.** Total electron content variations in the ionosphere before the Colima, Mexico, earthquake of 21 January 2003. *Geofisica Internacional*, v. 44, N 4, p. 369-377, 2005.
- Romanovskaya Yu.V., Namgaladze A.A., Zolotov O.V., Starikova N.A., Lopatyy V.Z.** Searching for seismo-ionospheric earthquakes precursors: Total electron content disturbances before 2005-2006 seismic events. *Proceedings of the MSTU*, v. 15, N 2, p. 477-481, 2012.
- Zakharenkova I.E., Shagimuratov I.I., Krankowski A., Lagovsky A.F.** Precursory phenomena observed in the total electron content measurements before great Hokkaido earthquake of September 25, 2003 (M=8.3). *Studia Geophysica et Geodaetica*, v. 51, N 2, p. 267-278, 2007.
- Zakharenkova I.E., Shagimuratov I.I., Tepenitzina N.Yu., Krankowski A.** Anomalous modification of the ionospheric total electron content prior to the 26 September 2005 Peru earthquake. *J. of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v. 70, N 15, p. 1919-1928, doi: 10.1016/j.jastp.2008.06.003, 2008.
- Zhao B., Wang M., Yu T.** Ionospheric total electron content variations prior to the 2008 Wenchuan earthquake. *International Journal of Remote Sensing*, v. 31(13), p. 3545-3557, doi: 10.1080/01431161003727622, 2010.
- Zolotov O.V., Namgaladze A.A., Prokhorov B.E.** Specific features of ionospheric total electron content variations in the periods of preparation of the earthquakes on March 11, 2011 (Japan) and October 23, 2011 (Turkey). *Russian Journal of Physical Chemistry B.*, v. 7, N 5, p. 599-605, doi: 10.1134/S1990793113050266, 2013.
- Zolotov O.V., Namgaladze A.A., Zakharenkova I.E., Martynenko O.V., Shagimuratov I.I.** Physical interpretation and mathematical simulation of ionospheric precursors of earthquakes at midlatitudes. *Geomagnetism and Aeronomy*, v. 52, N 3, p. 390-397, doi: 10.1134/S0016793212030152, 2012.

Информация об авторах

Романовская Юлия Владимировна – Политехнический институт МГТУ, кафедра физики, канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник, e-mail: y-romanovskaya@yandex.ru

Romanovskaya Yu.V. – Polytechnic Institute of MSTU, Physics Department, Cand. of Phys.-Math. Sci., Scientist, e-mail: y-romanovskaya@yandex.ru

Намгалдзе Александр Андреевич – Политехнический институт МГТУ, кафедра физики, д-р физ.-мат. наук, профессор, гл. науч. сотрудник, e-mail: namgaladze@yandex.ru

Namgaladze A.A. – Polytechnic Institute of MSTU, Physics Department, Dr of Phys.-Math. Sci., Professor, Head Scientist, e-mail: namgaladze@yandex.ru