

УДК 629.78, 26.2.3 20.1

Вариация полного электронного содержания в ионосфере в период сейсмической активности в 2009 г. в Италии

И.Н. Сушкин*

*Сибирский федеральный университет,
Россия 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79¹*

Received 4.02.2011, received in revised form 11.02.2011, accepted 18.02.2011

В статье рассматривается изменение электронной концентрации в ионосферном слое Земли в период сейсмической активности, а также во время землетрясения 6 апреля 2009 г. магнитудой 6,3 балла по шкале Рихтера. Рассматривается период с 1 марта 2009 г. по 26 апреля 2009 г. Определение электронной концентрации проводили по измеренным радионавигационным параметрам навигационной спутниковой системы GPS.

Ключевые слова: ГЛОНАСС, GPS, землетрясение, ионосфера, электронная концентрация, навигационная спутниковая система.

Введение

В настоящее время известны некоторые литосферные признаки землетрясений, такие как сдвиговые деформации земной поверхности, изменение ориентации осей сжатия, изменения соотношения скоростей продольных и поперечных сейсмических волн, изменение составляющих геомагнитного поля и удельного электрического сопротивления земной коры, неоднородности в ионосфере над очагом и т.д. Одним из чувствительных электродинамических датчиков литосферных аномалий является ионосфера Земли. В наши дни изменение концентрации различных элементов в подземных водах признано одним из предвестников землетрясений. При нормальных условиях концентрация радона в подземных водах изменяется слабо, если не считать суточных и годовых вариаций, при условии, что поступление радона сохраняется постоянным. Согласно модели дилатансии перед землетрясением в породах гипоцентральной области образуются мелкие трещины и поры, что приводит к увеличению площади поверхности пород [1]. Через образовавшиеся трещины радон мигрирует с подземными водами на поверхность. Кроме вышеописанных явлений можно ожидать флуктуации содержания радона в приповерхностных слоях из-за вероятных изменений перед землетрясением, возникающих в системе подземных вод благодаря сжатию, расширению, наклонам, деформациям водоносных горизонтов и изменению проницаемости из-за вариаций напряжений в земной коре. Вследствие миграции радона из

* Corresponding author E-mail address: isushkin@sfu-kras.ru

¹ © Siberian Federal University. All rights reserved

подземных вод в атмосферу Земли существует локальное повышение электронной концентрации в ионосферном слое [2].

Другое явление, приводящее к увеличению электронной концентрации в ионосферном слое Земли, – возникновение сейсмической активности в литосфере, сопровождающееся протеканием различных процессов в околоземной плазме, таких как вариация электронной плотности в слоях ионосферы над эпицентральной областью, низкочастотные всплески шумовых излучений в диапазоне 0,01-1 кГц, распространение акустико-гравитационных волн.

Определение полного электронного содержания в ионосфере

Атмосфера имеет ярко выраженную частотную избирательность. Неоднородное по высоте распределение диэлектрической проницаемости вызывает искривление траектории распространения радиоволн – рефракцию. Вследствие этого на рабочей частоте навигационного космического аппарата (НКА) 1,6 ГГц погрешность определения псевдодалности составляет от 5 до 50 м. Основное влияние на задержку радиосигнала в ионосфере вносит электронная концентрация, которая постоянно изменяется в зависимости от времени (часа суток, сезона, фазы цикла солнечной активности), географических координат, высоты над уровнем моря, от солнечной активности [3].

Для описания высотного профиля электронной концентрации применяют различные модельные зависимости, учитывающие наиболее характерные особенности строения ионосферы. В настоящее время наиболее часто используют параболически экспоненциальную модель и биэкспоненциальную модель. Из сопоставления графиков этих моделей, представленных в [3], можно сделать вывод, что модели дают близкие результаты. Для примера рассмотрим биэкспоненциальную модель. Поправка к групповому пути для биэкспоненциальной модели профиля электронной концентрации при произвольном угле места [4] равна

$$S_i = \frac{4,03 \cdot 10^7}{f_i^2} \gamma N_m \frac{1}{\sin \alpha_i} \sum_{j=1}^{j=2} (-1)^{j+1} H_j \left[1 - \exp\left(-\frac{z_\varepsilon - H_0}{H_j}\right) \right] \quad (1)$$

где S_i – задержка распространения сигнала i -го НКА в ионосфере, вычисляемая по формулам: $S_i = 1.531 \cdot c \cdot (\tau_i(f_2) - \tau_i(f_1))$ для спутников системы ГЛОНАСС и $S_i = 1.546 \cdot c \cdot (\tau_i(f_2) - \tau_i(f_1))$ для спутников системы GPS, $\tau_i(f_1)$ – время распространения сигнала от i -го НКА, измеренное на частоте f_1 , $\tau_i(f_2)$ – время распространения сигнала от i -го НКА, измеренное на частоте f_2 , c – скорость света в вакууме,

$$N_m = \frac{4,03 \cdot 10^7}{f_i^2 S_i} \gamma \frac{1}{\sin \alpha_i} \sum_{j=1}^{j=2} (-1)^{j+1} H_j \left[1 - \exp\left(-\frac{z_u - H_0}{H_j}\right) \right],$$

$H_0 = 200$ км, $H_1 = 325$ км, $H_2 = 32,5$ км, $z_\varepsilon = \sqrt{R_e^2 + 2R_e R_i \sin \alpha_i + R_i^2} - R_e$, высота источника излу-

чения, R_e – радиус Земли, α_i – угол места i -го НКА относительно навигационной аппаратуры по-

требителя (НАП), $\gamma^{-1} = \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^{\frac{h_2}{h_1 - h_2}} - \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^{\frac{h_1}{h_1 - h_2}} = 1,435$, f_i – излучаемая частота сигнала i -го НКА,

$$R_i = \sqrt{(x_\epsilon - x)^2 + (y_\epsilon - y)^2 + (z_\epsilon - z)^2}, \quad \sin(\alpha_i) = \frac{x(x_\epsilon - x) + x(z_\epsilon - z) + z(z_\epsilon - z)}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} R_i}, \quad x, y, z - \text{координаты}$$

НАП, x_{ci} , y_{ci} , z_{ci} – координаты i -го НКА.

Поскольку опорные генераторы, находящиеся на навигационной аппаратуре потребителя и на навигационном космическом аппарате, не синхронны, то существует расхождение временной шкалы между навигационной аппаратурой потребителя (НАП) и навигационным космическим аппаратом (НКА), соответственно дальность между i -м НКА и НАП определяется по формуле

$$\tau_{ci} c = \sqrt{(x_{ci} - x)^2 + (y_{ci} - y)^2 + (z_{ci} - z)^2} + c\Delta t,$$

где Δt – расхождения временных шкал между НАП и навигационной системой.

Угол места НКА относительно НАП можно определить по формуле

$$\sin(\alpha) = \frac{x(x_{ci} - x) + x(z_{ci} - z) + z(z_{ci} - z)}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} R}.$$

Задержка распространения сигнала от НКА до НАП зависит от геометрической дальности, от задержки распространения сигнала в ионосфере и тропосфере. Уравнение для определения задержки будет иметь вид

$$\tau_{ci} = \frac{R_i + S_i + \tilde{S}_i}{c},$$

где \tilde{S}_i – задержка распространения сигнала от i -го НКА до НАП в тропосфере.

Время распространения сигнала в ионосфере можно определить путем измерения времени распространения сигнала от НКА до НАП на двух частотах f_1 и f_2 , с последующим вычислением разности задержек этих сигналов на трассе по формуле $\delta\tau_i = \tau_i(f_2) - \tau_i(f_1)$, равной разности дополнительных групповых задержек в ионосфере на разных частотах. В результате получим выражения:

$$S_i = 1.531 \cdot c \cdot (\tau_i(f_2) - \tau_i(f_1)) \text{ для спутников системы ГЛОНАСС}, \quad (2)$$

$$S_i = 1.546 \cdot c \cdot (\tau_i(f_2) - \tau_i(f_1)) \text{ для спутников системы GPS}. \quad (3)$$

Используя выражения (1) и (2 или 3), в зависимости от используемого спутника в текущей момент измерения, можно вычислить электронную концентрацию в ионосфере на пути прохождения сигнала от НКА до НАП и определить градиент и максимум электронной концентрации. По полученным данным строится регистрограмма волнового процесса, по параметрам которой вычисляют магнитуду M и время ожидаемого удара t_x . В момент времени, когда градиент электронной концентрации максимальный, полученные координаты x_{ci} , y_{ci} , z_{ci} переводят в географические координаты – широту и долготу, тем самым определяют координаты вероятного землетрясения [5].

Сейсмическая активность в Италии в апреле 2009 года

С 28 марта по 24 апреля 2009 г. в Италии было зафиксировано около 50 случаев землетрясений. В табл. 1 представлены наиболее характерные землетрясения в этот период с магнитудой более 5 баллов по шкале Рихтера [6].

Землетрясение с максимальной магнитудой (6,3 балла) произошло 06.04.2009 в 01:32:39 по всемирному времени (UTC) на глубине 8,8 км в районе г. Терни с координатами 42,334°СШ, 13,334°ВД.

При расчете электронной концентрации и координат точек пересечения сигнала с ионосферой использовали данные со станции unrg (42,93°СШ, 12,35°ВД), принадлежащей сети стационарных двухчастотных GPS приемников IGS (International GNSS Service) [7].

На рис. 1 представлены координаты землетрясения (помечено крестом), местоположение станции unrg (квадрат) и точек пересечения сигналов (передаваемых со всех спутников в данной области в течение суток) с ионосферой.

Таблица 1. Наиболее характерные землетрясения

Дата	Время	Широта	Долгота	Глубина, км	Магнитуда
06.04.2009	1:32:39	42.33	13.33	8	6.3
07.04.2009	17:47:37	42.28	13.46	15	5.5
09.04.2009	0:52:59	42.48	13.34	15	5.3
09.04.2009	19:38:17.36	42.51	13.33	2	5.2

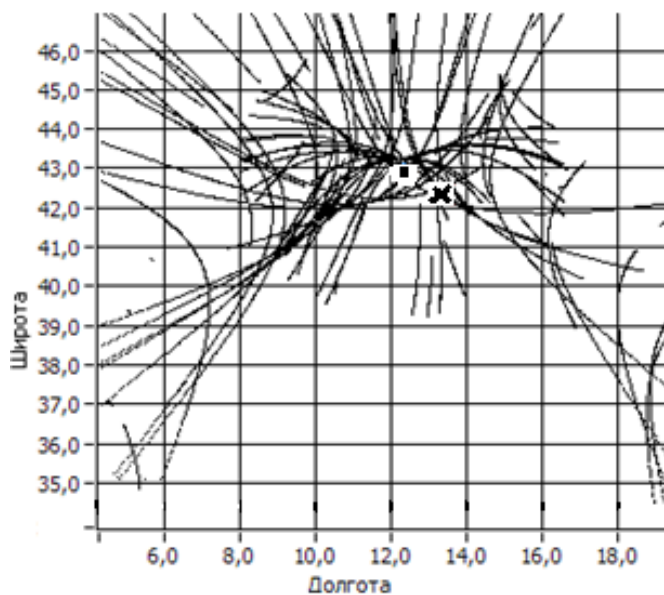


Рис.1 Координаты землетрясения, станции unrg и точек пересечения сигналов с ионосферой

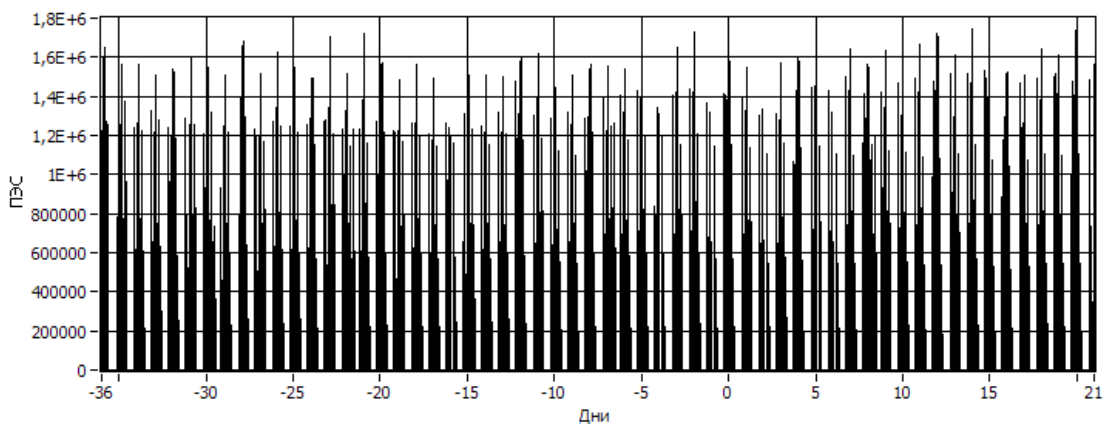


Рис. 2. Зависимость ПЭС от времени для области 42° – 42,5° СШ, 13° – 13,5° ВД за рассматриваемый период

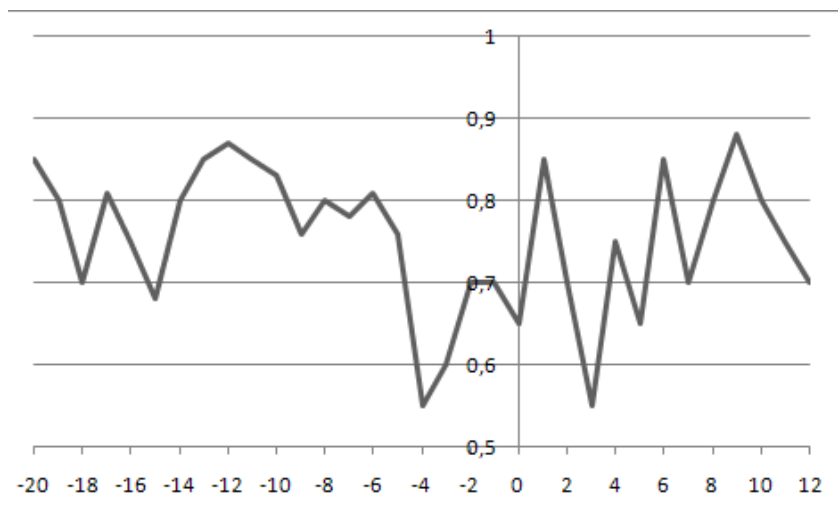


Рис. 3. Коэффициенты корреляции значений ПЭС смежных дней

На рис. 2 отражена зависимость полного электронного содержания (ПЭС) от времени для области 42° – 42,5° СШ, 13° – 13,5° ВД за рассматриваемый период. Данные следуют с интервалом в 30 с. За нулевой день принят день основного толчка 06.04.2009.

На рис. 3 даны коэффициенты корреляции значений ПЭС смежных дней, рассчитанные по формуле

$$\tilde{N} = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} (x_i - M\{x\})(y_i - M\{y\})}{(N-1)\sigma_x \sigma_y}, \quad (4)$$

где $M\{x\}$ и $M\{y\}$ – математические ожидания массивов x и y соответственно, σ_x и σ_y – среднеквадратические отклонения массивов x и y соответственно, N – длина массивов x и y .

На рис. 4 представлены суточные среднеквадратические отклонения ПЭС (σ_x).

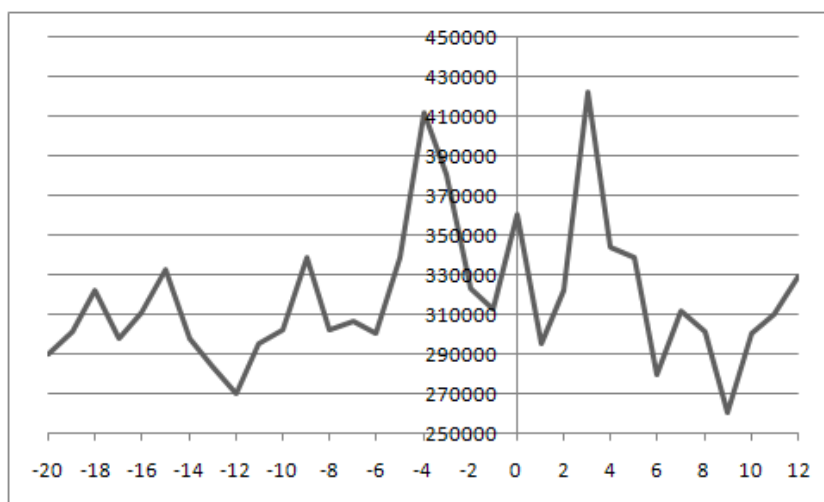


Рис. 4. Суточные среднеквадратические отклонения ПЭС

Анализируя графики, можно сделать следующие выводы:

1. За четверо суток до землетрясения наблюдается резкий скачок среднеквадратического отклонения ПЭС и, как следствие, уменьшение коэффициента корреляции; это объясняется резким возмущением ионосферного слоя Земли.
2. За двое суток до землетрясения коэффициент корреляции приближается к норме, что свидетельствует о продолжении возмущения ионосферного слоя Земли с некоторыми колебаниями электронной концентрации.
3. С 6 по 9 апреля 2009 г. в Италии наблюдались толчки магнитудой более 5 баллов (см. таблицу) и в связи с этим скачкообразное изменение коэффициента корреляции.

Заключение

Вследствие сделанных в работах [2, 4] предпосылок о возмущении ионосферного слоя Земли накануне предстоящего землетрясения и результата эксперимента, проведенного автором, можно с высокой вероятностью предсказать землетрясения за двое суток с магнитудой 6 и более баллов посредством измерения электронной концентрации в ионосфере.

Работа выполнена при поддержке Программы развития Сибирского федерального университета.

Список литературы

1. Сушкин И.Н. Применение ГНСС ГЛОНАСС и GPS для оценки электронной концентрации в ионосферном слое F, для предсказания и регистрации землетрясений // Известие высших учебных заведений. Физика. 2008. Т. 51. С. 214-216.
2. Липеровский В.А., Похотелов О.А., Шалимов С.П. Ионосферные предвестники землетрясений. М.: Наука, 1992.

3. Бакитько Р.В., Васильев М.Б., Виноцкий А.С. Радиосистемы межпланетных космических аппаратов. М.: Радио и связь, 1993. – 324 с.
4. Сушкин И.Н. Способ одночастотного определения задержки сигналов навигационной спутниковой системы в ионосфере: Патент 2313103 Рос. Федерация, опубл. 20.12.2007 г.
5. Сушкин И.Н. Способ предсказания землетрясения: Патент 2332692 Рос. Федерация, опубл. 27.08.2008 г.
6. Американская геологическая служба:[сайт] URL: <http://www.usgs.gov/>.
7. SOPAC (Scripps Orbit and Permanent Array Center): [сайт] URL: <http://sopac.ucsd.edu/>.
8. Kuzmin Evgeny Accelerated Phase-lock-loop Frequency Control Method of User's Equipment in Perspective Radio Navigation Systems, Journal of Siberian Federal University/ Engineering & Technologies 3 (2008 1) 276-286.

TEC Variation in the Ionosphere During the Seismic Activity Period in 2009 in Italy

Igor N. Sushkin

*Siberian Federal University,
79 Svobodny, Krasnoyarsk, 660041 Russia*

This paper investigated change of electronic concentration in ionospheres layer of the Earth in seismic activity is considered, and also during earthquake on April, 6th, 2009 by magnitude 6,3 points under the Richter scale. The determination of electronic concentration is considered from March, 1st, till April, 26th, 2009 spent on the measured radionavigating parametres of navigating satellite system GPS.

Key words: GLONASS, GPS, earthquake, ionospheres, electronics' concentration, navigation satellites systems.
