

УДК 523.62

ПРОВЕРКА ГИПОТЕЗЫ О ЛОКАЛЬНОСТИ НАРУШЕНИЯ СУТОЧНОГО ХОДА ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ПЕРЕД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ

¹Э.Л. Афраимович, ¹Э.И. Астафьева, ¹Н.С. Гаврилюк, ²И.В. Живетьев

TESTING OF THE HYPOTHESIS OF LOCALITY OF DEVIATION OF TOTAL ELECTRON CONTENT DIURNAL VARIATIONS BEFORE EARTHQUAKES

¹E.L. Afraimovich, ¹E.I. Astafyeva, ¹N.S. Gavrilyuk, ²I.V. Zhivetiev

В ряде исследований отмечено отклонение от регулярного суточного хода максимальной электронной концентрации слоя F2 и/или полного электронного содержания (ПЭС) вблизи эпицентра землетрясения на протяжении несколько дней перед главным толчком. В связи с важностью этой проблемы возникает необходимость проверки гипотезы о локальности этих эффектов. Необходимо четко отделить изменения состояния ионосферы, связанные с локальными процессами подготовки землетрясений, от глобальных изменений ионизации атмосферы в целом, обусловленных вариациями потока УФ-излучения Солнца в широком диапазоне временных периодов. Авторами разработан метод такой проверки, основанный на вычислении глобального электронного содержания. Рассматривается обнаруженный рядом авторов эффект увеличения максимального значения ПЭС перед землетрясением. Показано, что в ряде случаев этот эффект может быть отражением глобального увеличения ионизации на положительной фазе 27-дневной вариации ПЭС. Предложен метод коррекции данных, позволяющий отделить локальные изменения ПЭС от глобальных.

A number of papers have reported about deviations of daily values of the maximum electron concentration of the ionospheric F2 layer and/or total electron content (TEC) in the vicinity of an earthquake's epicenter within some days prior to the main shock. Owing to the importance of this problem, a question of locality of those effects is arising. It is necessary to distinguish clearly the ionosphere changes caused by processes of earthquakes preparation and global changes of the atmosphere ionization as a whole, due to variations of solar EUV radiation within wide range of time periods. We have developed a method based on calculation of the mean TEC value for selected region. In this paper the effect of TEC increasing before strong earthquakes is analyzed. It is shown that in a number of cases the effect of TEC increasing before strong earthquakes might be a reflection of global increasing of the ionization at a positive phase of 27-day TEC variations.

Введение

Ионосферные эффекты, так или иначе связанные с сейсмической активностью, вызывают повышенный интерес многих исследователей уже в течение нескольких десятков лет [1–3]. В последнее время развитие мониторинга ионосферных предвестников землетрясений связывается с использованием сигналов глобальных навигационных систем GPS-ГЛОНАСС-GALILEO, позволяющих определить пространственное распределение и динамику полного электронного содержания (ПЭС) в ионосфере. Это обусловлено целым рядом преимуществ по сравнению с классическими радиофизическими средствами зондирования ионосферы, таких как непрерывность, высокое пространственно-временное разрешение и глобальность мониторинга ионосферных возмущений различной природы, а также экономичность, обусловленная использованием уже существующей космической и наземной инфраструктуры навигационных систем.

Исследования [4–10] посвящены поиску аномалий ПЭС, сопряженных с готовящимися землетрясениями, на фоне «спокойной» ионосферы. Описанные в указанных работах аномалии носят локальный характер, длятся несколько часов в течение периода, достигающего 5–6 дней, и появляются в течение указанного периода в одно и то же местное время.

Однако в цитируемых выше работах отсутствует доказательство статистической значимости обнаруженных предвестников с учетом реальной точности измерений ПЭС (не лучше 20–30 % [11]), а также анализ подобных аномалий, никак не связанных с подготовкой землетрясений. В связи с важностью этой проблемы возникает необходимость проверки гипотезы о локальности нарушения суточного хода ПЭС перед

землетрясением. В настоящем докладе мы предлагаем метод такой проверки.

Метод проверки гипотезы о локальности аномалии

В 2005 г. в ИСЗФ СО РАН был впервые предложен новый подход к решению проблемы солнечно-земных связей путем определения глобального электронного содержания (ГЭС), равного полному количеству электронов в околоземном космическом пространстве, ограниченном высотой орбиты ИСЗ радионавигационной системы GPS (около 20200 км) [12]. Преимуществом такого подхода является то, что локальные особенности характеристик ионосферы нивелируются, в итоге выявляются закономерности, характеризующие динамику глобального электронного содержания.

Основная идея предложенного нами способа проверки заключается в следующем. Монотонный рост (или спад) максимального значения ПЭС в течение нескольких дней может быть связан не с локальными изменениями, а с ростом (или спадом) глобального содержания электронов, обусловленного соответствующими изменениями потока УФ-излучения Солнца.

Относительная амплитуда 27-дневных вариаций исходных рядов ГЭС может достигать весьма значимой величины $\pm 15\text{--}20\%$ [13]. В абсолютных величинах ПЭС при среднем уровне 20 TECU это означает изменение ПЭС в пределах от 12 до 28 TECU, что сравнимо с обнаруженными в [4–10] аномалиями ПЭС. При этом длительность фазы 27-дневной вариации ГЭС с максимальным значением производной ПЭС того же порядка (около 7–10 дней), что и длительность обсуждаемых в [4–10] аномалий ПЭС.

В настоящей работе мы используем концепцию ГЭС для проверки гипотезы о локальности обнару-

женных аномалий ПЭС, с тем отличием, что вместо расчетов ГЭС более удобным представляется вычисление среднего для выбранного региона значения ПЭС.

Метод основан на использовании GIM-карт [11], вычисляемых по данным международной сети приемников GPS в нескольких научных центрах (JPL, США; CODE, Швейцария, и др.). Пространственный диапазон карт GIM в стандартном формате IONEX $\pm 180^\circ$ по долготе и $\pm 90^\circ$ по широте; размер элементарной ячейки GIM – 5° по долготе и 2.5° по широте; общее количество ячеек GIM $N_{\max} = 5184$. Для каждого момента времени с двухчасовым временным разрешением из файлов IONEX известны значения вертикального ПЭС I_{ij} , где индексы i, j указывают на координаты (широту и долготу) ячейки GIM.

Среднее значение ПЭС $\langle I(t) \rangle$ по всему земному шару или выбранному региону вычисляется путем суммирования по всем N ячейкам GIM значений ПЭС

$$\langle I \rangle = \sum I_{i,j} / N \quad (1)$$

Примеры землетрясений

Рассмотрим в качестве первого примера локальную зависимость среднего значения ПЭС перед землетрясением 25 сентября 2003 г. вблизи о. Хоккайдо в Японии с магнитудой $M=8.3$. Локальные значения $\langle I(t) \rangle$ получены путем усреднения на территории $32\text{--}38^\circ \text{N}$; $130\text{--}140^\circ \text{E}$ в интервале времени за 10 дней до и 10 дней после землетрясения (рис. 1, в; момент главного толчка отмечен вертикальной стрелкой). Кружком на панели в отмечено anomальное (по сравнению с предыдущими днями) повышение максимального значения ПЭС за 2–3 дня до землетрясения. Этот эффект авторы [5] интерпретируют как возможный предвестник землетрясения. В [5] отмечен также большой пространственный масштаб обнаруженной аномалии (до 2000 км).

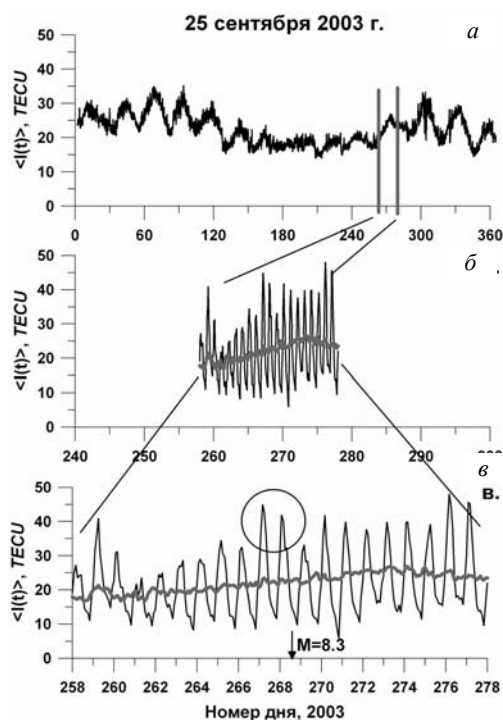


Рис. 1. Сравнение локальных и глобальных вариаций ПЭС до и после землетрясения 25 сентября 2003 г.

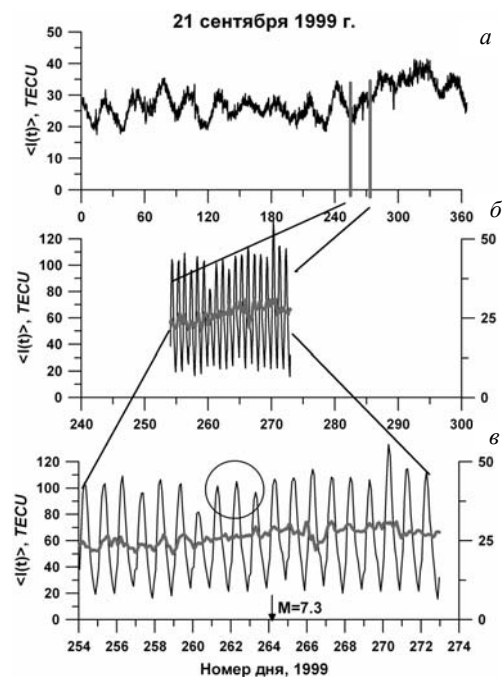


Рис. 2. То же, что на рис. 1, но для землетрясения 21 сентября 1999 г.

Проверим, является ли данная аномалия суточного хода ПЭС действительно локальной, т. е. связанной с регионом будущего землетрясения. Технология расчета среднего по всему земному шару значения ПЭС $\langle I(t) \rangle$ дает возможность сравнить локальные изменения с динамикой глобального электронного содержания. На рис. 1, а эта зависимость нанесена для всего 2003 г., а на рис. 1, б, в – для анализируемого 20-дневного интервала времени (толстые серые кривые).

Сравнение локальной и глобальной зависимостей $\langle I(t) \rangle$ позволяет усомниться в локальности обнаруженной аномалии ПЭС. Обнаруженный в [5] эффект увеличения максимального значения ПЭС перед землетрясением 25.09.03 г. может быть отражением глобального увеличения ионизации на положительной фазе 27-дневной вариации ПЭС.

Эффективность проведенной проверки основана на высокой точности вычисления среднего по всему земному шару $\langle I(t) \rangle$ – лучше 0.5 TECU по сравнению со средней по территории ~ 5 TECU.

В качестве второго примера рассмотрим локальную зависимость среднего значения ПЭС перед землетрясением 21 сентября 1999 г. на о. Тайвань с магнитудой $M=7.3$. Локальные значения $\langle I(t) \rangle$ получены путем усреднения на территории $20\text{--}26^\circ \text{N}$; $118\text{--}124^\circ \text{E}$ в интервале времени за 10 дней до и 9 дней после землетрясения (рис. 2, в; момент главного толчка отмечен вертикальной стрелкой). На рис. 2, а эта зависимость нанесена для всего 1999 г., а на рис. 2, б, в – для анализируемого 20-дневного интервала времени (толстые серые кривые). Кружком на панели в) отмечено anomальное (по сравнению с предыдущими днями) повышение максимального значения ПЭС за 2–3 дня до землетрясения.

И в этом случае сравнение локальной и глобальной зависимостей $\langle I(t) \rangle$ позволяет усомниться в локальности обнаруженной аномалии ПЭС. Обна-

руженный в [9] эффект увеличения максимального значения ПЭС перед землетрясением 21.09.1999 г. может быть отражением глобального увеличения ионизации на положительной фазе 27-дневной вариации ПЭС.

Аналогичный вывод можно сделать при сравнении глобальной и локальной зависимости среднего значения ПЭС и относительно землетрясения 12 ноября 1999 г. в Турции с магнитудой $M=7.5$. Локальные значения $\langle I(t) \rangle$ получены путем усреднения на территории $36-44^\circ \text{ N}$; $24-36^\circ \text{ E}$ в интервале времени за 10 дней до и 10 дней после землетрясения (рис. 3, *в*; момент главного толчка отмечен вертикальной стрелкой). Кружком на панели *в* отмечено anomальное (по сравнению с предыдущими днями) повышение максимального значения ПЭС за 2-3 дня до землетрясения.

Теперь рассмотрим землетрясение 26 декабря 2004 г. вблизи о. Суматра с магнитудой 9.0. Локальные значения $\langle I(t) \rangle$ получены путем усреднения на территории $0-10^\circ \text{ N}$; $95-105^\circ \text{ E}$ в интервале времени за 10 дней до и 10 дней после землетрясения (рис. 4, *в*; момент главного толчка отмечен вертикальной стрелкой).

Анализ данных рис. 4 не позволяет сделать заключение о какой-либо значимой связи вариаций ПЭС вблизи эпицентра с предстоящим землетрясением, поскольку увеличение амплитуды суточных колебаний ПЭС в регионе (рис. 4, *б*, *в*, тонкие кривые) фактически повторяет динамику соответствующих колебаний среднего значения ПЭС по всему земному шару (рис. 4, *б*, *в*, толстые серые кривые).

Таким образом, сравнение глобальных и локальных зависимостей ПЭС для всех анализируемых событий, проведенное в настоящей работе, показало, что зарегистрированные в серии публикаций [4-10] аномалии ПЭС могут быть вызваны не столько усилением сейсмической активности перед землетря-

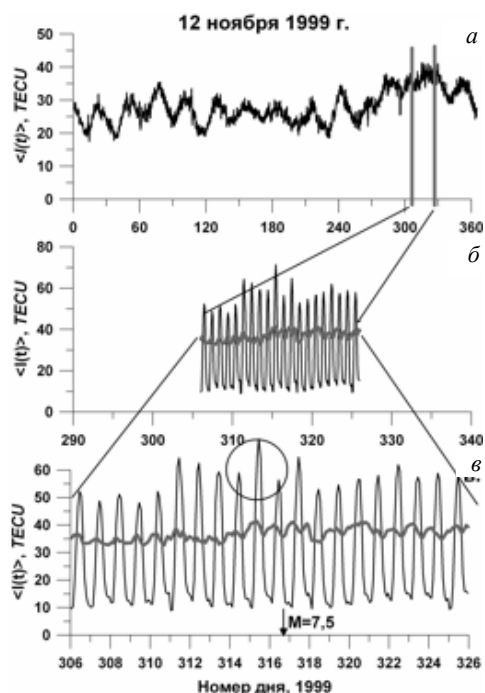


Рис. 3. То же, что на рис. 1, но для землетрясения 12 ноября 1999 г.

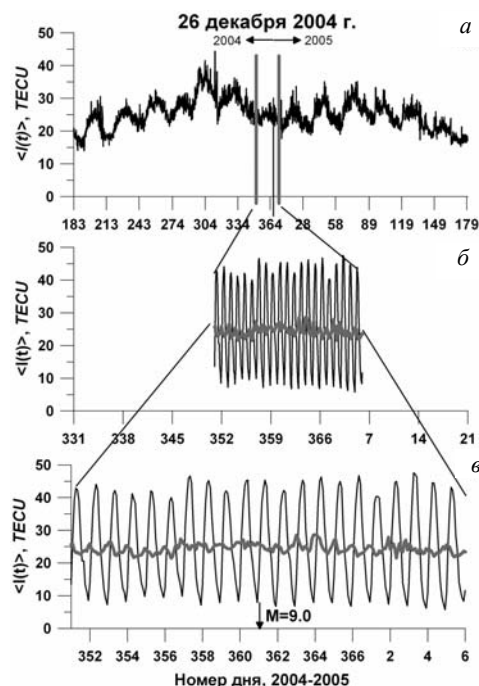


Рис. 4. То же, что на рис. 1, но для землетрясения 26 декабря 2004 г.

сением, сколько изменениями глобальной ионизации, связанной с динамикой УФ-излучения Солнца. Для того чтобы разделить относительный вклад этих процессов в изменения ПЭС, необходимы дополнительные исследования.

Предложенный нами подход можно использовать во всех ситуациях, когда обнаруженные «отклонения от нормы» ионосферных параметров связывают не только с землетрясениями, но и с другими локальными событиями типа ураганов, тайфунов, погодных аномалий и антропогенных воздействий.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ N 06-05-39026, 07-05-00127, а также интеграционного гранта СО РАН-ДВО РАН-НАН Украины N 3.24.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гохберг М.Б., Моргунов В.А., Похотелов О.А. Сейсмoeлектромагнитные явления. М.: Наука, 1988. 174 с.
2. Пулинец С.А., Легенька А.Д., Зеленова Т.И. Зависимость сейсмо-ионосферных вариаций в максимуме слоя от местного времени // Геомагнетизм и аэрoномия. 1998. Т. 38, № 3. С. 178-182.
3. Pulinets S.A. Seismic activity as a source of the ionospheric variability // Adv. Space Res. 1998. V. 22, N 6. P. 903-906.
4. Захаренкова И.Е. Использование измерений сигналов системы GPS для обнаружения ионосферных предвестников землетрясений // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Калининград. 2007. С. 20.
5. Захаренкова И.Е., Шагимурагов И.И., Лаговский А.Ф. Модификация ионосферы в период подготовки землетрясений по данным спутниковой системы GPS // Труды XXI Всероссийской научной конференции «Распространение радиоволн». 2005. Т. 1. С. 194-198.
6. Захаренкова И.Е., Шагимурагов И.И., Лаговский А.Ф., Кранковский А. Исследование ионосферных предвестников для землетрясений класса $M \sim 5.0$ // Электронный журнал «Исследовано в России». 2006. Т. 39. С. 1047-1055.

7. Калинин Ю.К., Сергеев Н.П. Движущиеся уединенные макронеоднородности, возникающие в ионосфере за несколько часов до катастрофических землетрясений // Доклады академии наук. 2002. Т. 387, № 1. С. 105–107.

8. Liu J.Y., Chen Y.I., Chuo Y.J., Tsai H.F. Variations of ionospheric total electron content during the Chi-Chi earthquake // Geophys. Res. Lett. 2001. V. 28, N 7. P. 1383–1386.

9. Liu J.Y., Chuo Y.J., Shan S.J., et al. Pre-earthquake ionospheric anomalies registered by continuous GPS TEC measurements // Ann. Geophys. 2004. V. 22. P. 1585–1593.

10. Oraevsky V.N., Ruzhin Y.Y., Shagimuratov I.I. Anomalies of ionospheric TEC above Turkey before two strong earthquakes at 1999 // Proceedings of the 15th Wroclaw EMC Symposium. 2000.

11. Schaer S., Gurtner W. IONEX: The IONosphere Map EXchange Format Version 1 // Proceedings of the IGS AC Workshop, Darmstadt, Germany, February 9–11. 1998. P. 307–320.

12. Афраймович Э.Л., Астафьева Э.И., Живетьев И.В. Солнечная активность и глобальное электронное содержание // Доклады академии наук. 2006. Т. 409, № 3. С. 399–402.

13. Афраймович Э.Л., Астафьева Э.И., Ясюкевич Ю.В., Живетьев И.В. Глобальное электронное содержание. Метод определения и динамика в течение 23-го цикла солнечной активности // Байкальская международная молодежная научная школа по фундаментальной физике. Труды IX конференции молодых ученых «Физические процессы в космосе и околоземной среде», Изд-во ИСЗФ СО РАН, Иркутск. 2006. С. 109–111.

¹Институт солнечно-земной физики, Российская академия наук, Сибирское отделение, Иркутск.

²Институт космических исследований и распространения радиоволн, Российская академия наук, Дальневосточное отделение, Петропавлов-Камчатский.