

Использование сигналов глобальных навигационных спутниковых систем GPS/ГЛОНАСС для мониторинга сейсмоионосферных эффектов

И.Е. Захаренкова, Ю.В. Черняк, И.И. Шагимуратов

Западное отделение ИЗМИРАН,
236010, Калининград, пр. Победы, 41,
e-mail: zakharenkova@mail.ru

В работе представлены результаты анализа вариаций полного электронного содержания ионосферы (GPS TEC) в период подготовки мощного землетрясения в Японии 28 ноября 2004 года. Показано, что для рассматриваемого события проявляется специфическая картина ионосферных аномалий, возможных предвестников землетрясений, в виде значительного повышения электронной концентрации до 40–50 % относительно значений спокойного фона. Для более детального анализа обнаруженных эффектов привлекались наблюдения GPS TEC по отдельным GPS-станциям, расположенным на различных расстояниях от эпицентра, а также данные наземной станции вертикального зондирования ионосферы.

Ключевые слова: сейсмоионосферные эффекты, GPS, ГЛОНАСС, полное электронное содержание.

Введение

Начиная с первых работ, посвященных изучению ионосферных эффектов, ассоциированных с мощным землетрясением на Аляске 28 марта 1964 г. ($M = 9,2$) (Davies, Baker, 1965; Leonard, Barnes, 1965), уже несколько десятилетий ведутся интенсивные исследования аномальных эффектов сейсмогенной природы, проявляющихся в различных параметрах ионосферы (см. Липеровский и др., 1992; Atmospheric and Ionospheric., 1999; Краткосрочный., 1999).

Аномальные вариации ионосферы, ассоциированные с процессами подготовки землетрясений, регистрируются с помощью различных средств ионосферного мониторинга. Ранее наиболее часто для этих целей использовались измерения наземных станций вертикального зондирования ионосферы, а также спутниковые ионозонды.

В качестве ионосферных эффектов, предваряющих землетрясение, изучаются аномальные всплески электромагнитного излучения в достаточно широком диапазоне частот (УНЧ-ОНЧ), зарегистрированные на спутниках OGO-6, AE-C, ISIS-2, «Ареол-3», ALOUETTE, «Интеркосмос-19» и ряде других космических аппаратов.

Измерения с помощью наземных ионозондов позволили обнаружить модификацию электронной плотности F-слоя за несколько дней перед сильными землетрясениями (Гохберг и др., 1988; Gaivoronskaya, Zelenova, 1991; Краткосрочный..., 1999). Однако за последние годы количество действующих ионозондов мировой сети значительно сократилось, и только часть из них продолжает функционировать в непрерывном режиме. Таким образом, основным препятствием в исследованиях сейсмоионосферных эффектов на базе ионозондовых измерений — невозможность получения непрерывных данных в глобальном масштабе.

Запуск и развитие спутниковых навигационных систем GPS и ГЛОНАСС, создание специализированных проектов, направленных на исследование эффектов землетрясений и извержений вулканов в атмосфере и ионосфере (DEMETER, КОМПАС-2), бурное развитие всемирной и многочисленных региональных сетей GPS станций положили начало нового этапа в изучении ионосферных явлений в глобальном масштабе, и в частности вариаций, наблюдавшихся до и после сильных землетрясений.

В настоящее время сеть наземных GPS-станций (несколько тысяч по всему миру) обеспечивает одновременное глобальное покрытие и получение непрерывных измерений пара-

метров навигационных сигналов с высоким временным и пространственным разрешением. GPS-приемники наземных станций осуществляют измерения групповых и фазовых задержек радиосигналов $L_1 = 1575$ МГц и $L_2 = 1228$ МГц с 30-секундным интервалом одновременно для всех спутников, находящихся в зоне радиовидимости для данной GPS-станции. По измеренным ионосферным задержкам определяется содержание электронов на трассе GPS-спутник-приемник, а затем значения полного электронного содержания (TEC — total electron content) пересчитываются из наклонного в вертикальное. Вариации вертикального TEC достаточно чувствительны к изменениям электронной концентрации в максимуме слоя F2 ионосферы ($NmF2$), измеряемой с помощью ионозондов. Коэффициент корреляции между TEC и $NmF2$ достигает величины 0,8...0,9 (Krankowski et al., 2004). Так как электронная концентрация в максимуме слоя F2 является одним из наиболее чувствительных к сейсмической активности параметров ионосферы, то для оценки пространственных масштабов и временной динамики сейсмоионосферных эффектов практически в любом сейсмоактивном регионе мира мы можем использовать TEC-данные. На протяжении последнего десятилетия использование TEC измерений позволило выявить аномальную модификацию полного электронного содержания ионосферы перед многими землетрясениями (Liu et al., 2004; Pulinets, Boyarchuk, 2004; Zakharenkova et al., 2007, 2008).

В данной работе представлен анализ вариаций TEC для сильного землетрясения в Японии. Это землетрясение было зарегистрировано 28 (29) ноября 2004 г. в 18:32 UT (03:32 LT). Магнитуда была равна 7,0, глубина гипоцентра — 39 км. Географические координаты эпицентра E (42,99° с.ш., 145,06° в.д.). Геомагнитная обстановка в период, непосредственно предшествующий событию была спокойной. Вариации индексов геомагнитной активности за период 18–30 ноября 2004 г. представлены на рис. 1. Сумма K_p -индекса не превышала 30. Однако необходимо отметить наличие мощной геомагнитной бури ($D_{st} \approx -373$ нТл) 7–11 ноября 2004 г.

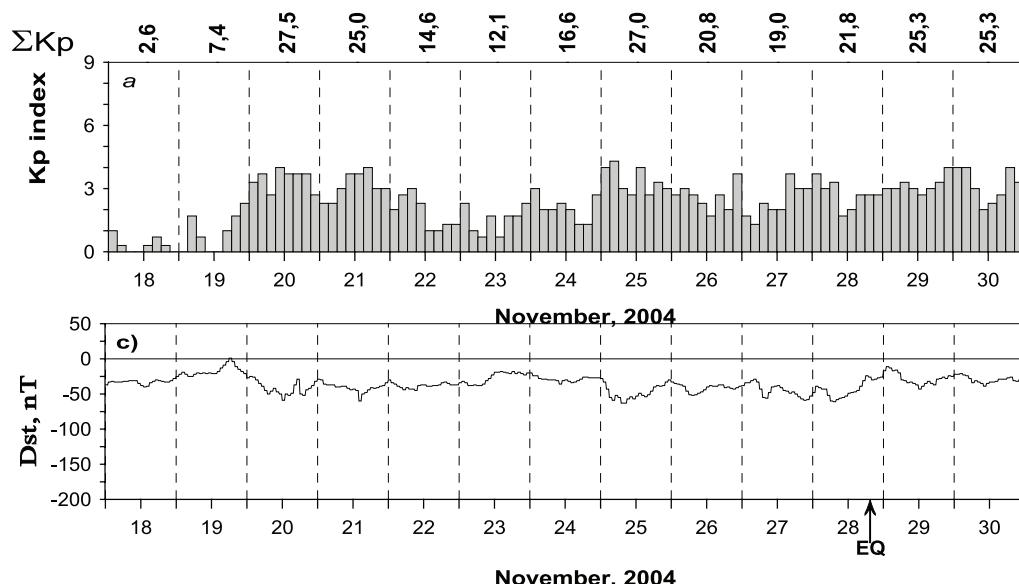


Рис. 1. Вариации K_p и D_{st} -индексов 18–30 ноября 2004 г. Стрелкой указан момент землетрясения

Результаты обработки и анализ данных

Анализ данных станции вертикального зондирования ионосферы Wakkanai

Для анализа вариабельности ионосферы перед рассматриваемым событием были привлечены данные измерений критической частоты слоя F2 ионосферы ($foF2$) по наиболее близкорасположенной станции вертикального зондирования ионосферы Wakkanai. Географи-

физические координаты станции — $45,16^{\circ}$ с.ш., $141,75^{\circ}$ в.д. На рис. 2 представлено географическое положение эпицентра землетрясения (черный круг), ионозонда Wakkani (треугольник) и положение трех стационарных GPS-станций.

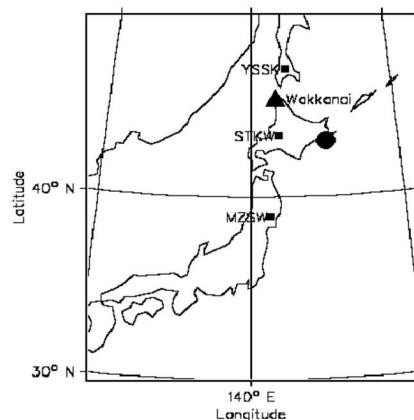


Рис. 2. Географическое положение эпицентра землетрясения, ионозонда и GPS-станций

На рис. 3 изображены вариации часовых значений критической частоты $foF2$ за 22–29 ноября 2004 г., а также медианные значения, рассчитанные за весь месяц. Относительные изменения $\Delta foF2$ ($\Delta foF2 = foF2 - foF2_{med}$) показаны на рис. 4. Данные представлены в локальном времени ($LT = UT + 9\text{ h}$). Заметное увеличение критической частоты $foF2$, а также изменение формы суточной вариации $foF2$ наблюдалось в дневное время 25–28 ноября 2004 г. Максимальное увеличение $foF2$ на частоте 2,6 МГц (36 % относительно медианных значений) было зафиксировано 8–9 ч LT 26 ноября 2004 г.

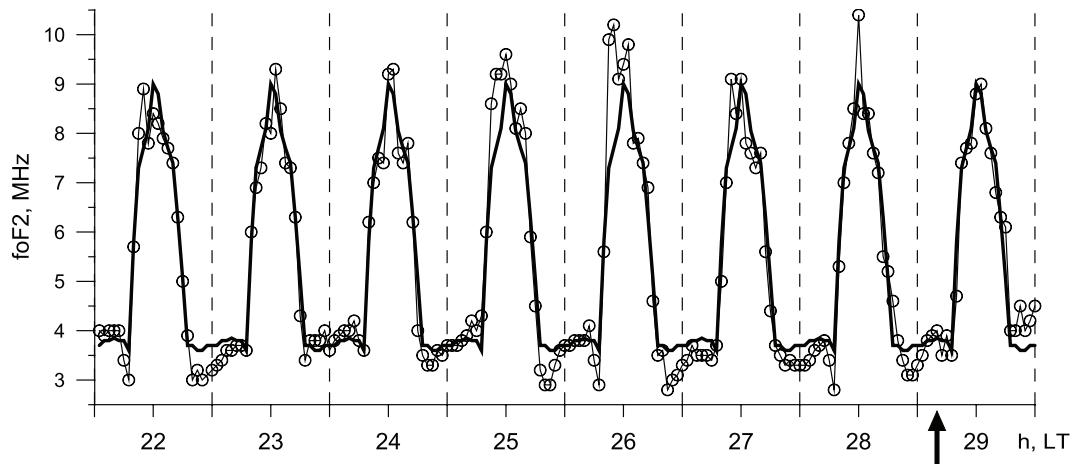


Рис. 3. Часовые значения критической частоты $foF2$ по станции Wakkani за 22–29 ноября 2004 г.
Толстой линией представлена месячная медиана

Анализ суточных вариаций GPS TEC

Для получения абсолютной величины задержек и восстановления суточной вариации TEC над станцией использовалась методика, представленная в работе (Baran et al., 1997). В соответствии с ней инструментальная задержка и абсолютное значение TEC рассчитываются, используя измерения всех пролетов спутников над станцией на 24-часовом интервале. В расчетах ионосфера аппроксимируется в виде тонкого слоя, расположенного на фиксированной высоте ($h = 400$ км). Для пересчета наклонного (вдоль луча) TEC в вертикальный используется геометрический фактор. В результате применения этой процедуры мы полу-

чаем как суточную вариацию ТЕС над станцией наблюдения, так и возможность анализа вариации абсолютной величины ТЕС вдоль траектории пролета для всех спутников систем GPS и ГЛОНАСС.

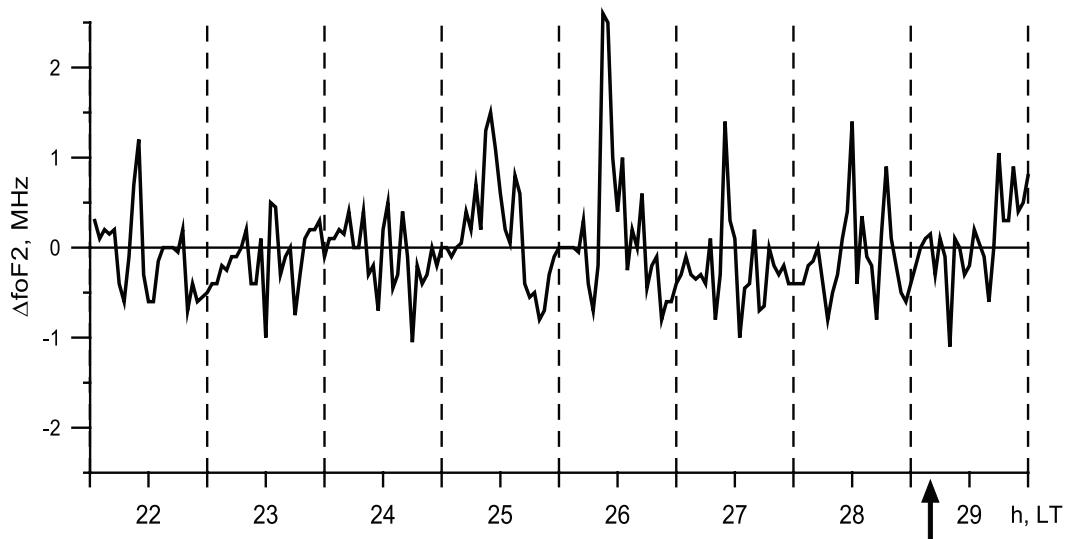


Рис. 4. Относительные вариации f_{oF2} за период 22–29 ноября 2004 г.

В данной работе мы использовали данные GPS станций YSSK, STKW, MZSW, входящих в сеть IGS. Данные наземные GPS приемники расположены на различных географических широтах между 38° с.ш. и 48° с.ш. и практически вдоль одной географической долготы 141° – 142° в.д. (см. рис. 2).

На рис. 5 показаны текущие значения (тонкая линия с маркерами) вертикального ТЕС, выраженные в ТЕС единицах ($TECU = 10^{16}$ эл/ m^2), для семи предшествующих дней и дня землетрясения над отдельными GPS станциями. Толстая линия представляет собой медиану, полученную осреднением вариации ТЕС за предшествующие 10 дней. Все данные представлены в локальном времени ($LT = UT + 9 h$). Анализ суточных вариаций показывает, что за 1–4 дня до землетрясения наблюдаются значительные отклонения значений ТЕС от медианных величин на всех станциях. Остальные дни рассматриваемого периода характеризуются относительно слабыми отклонениями текущих значений ТЕС от фоновых.

На правой панели рис. 5 показаны относительные отклонения ΔTEC ($\Delta TEC = TEC - TEC_{med}$) для рассматриваемых станций. Значительное увеличение значений полного электронного содержания ТЕС, на 4–6 TECU наблюдалось 1–4 дня перед землетрясением. 26 ноября во временном интервале 9–12 LT (0–3 UT) увеличение ТЕС достигло абсолютной величины ~6 TECU, что соответствует 35–40 % превышению относительно фоновых значений. Отрицательный эффект также наблюдался в вечернее и ночное время, однако его амплитуда была значительно меньше по сравнению с величиной положительного эффекта.

Анализ пространственных вариаций GPS TEC

Для оценки пространственных масштабов и временной динамики сейсмоионосферной аномалии были использованы глобальные ТЕС карты (GIMs — global ionospheric maps) в формате IONEX. Данные доступны через ftp-сервер: <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/ionex>. Глобальные ТЕС карты регулярно производятся IGS сообществом с разрешением 5° по долготе и $2,5^{\circ}$ по широте, временной шаг — 2 ч. Детальное описание алгоритмов расчета глобальных ТЕС карт, а также их валидации представлено в работе (Hernández-Pajares et al., 2009). Для анализа вариабельности ионосферы над регионом был применен метод построения дифференциальных карт: значения ТЕС за текущий день сравнивались с фо-

новыми ТЕС-картами, в качестве фоновых брались медианные значения, рассчитанные за предшествующий 10-дневный интервал скользящим окном.

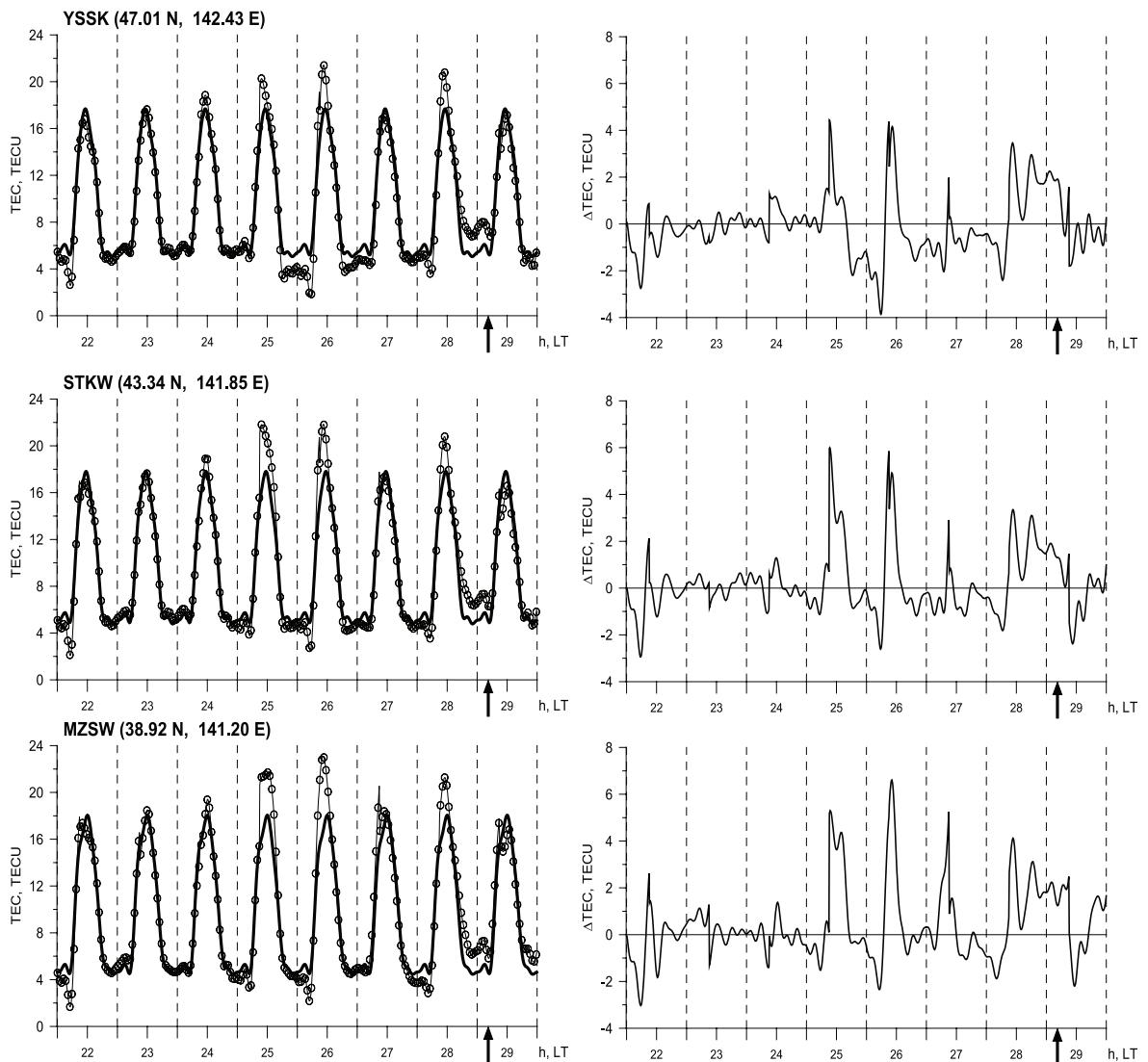


Рис. 5. Суточные вариации ТЕС и Δ ТЕС для трех станций региона за период 22–29 ноября 2004 г.

На рис. 6 представлены дифференциальные процентные ТЕС карты за 23–27 ноября 2004 г. для момента времени 00 UT (09 LT). По осям отложены географические широты и долготы, эпицентр землетрясения отмечен звездочкой. Как можно видеть, за 4–5 дней до землетрясения значения DTEC варьируются в пределах $\pm 10\%$ (уровень нормальной вариабельности «день ото дня» составляет 15–25 %). За 3 дня до события (25 ноября) в окрестностях эпицентрального района появляется локальная область положительных значений DTEC, величина максимального повышения ТЕС достигает 30 %, в эти же часы на следующий день (26 ноября) амплитуда положительной аномалии достигает 47–50 % относительно невозмущенного состояния. Область максимального повышения локализована в непосредственной близости от эпицентрального района. Область значительного повышения ТЕС (более 35 %) имеет размеры около 2500 км по долготе и 1500 км по широте. В предшествующий землетрясению день (27 ноября) в те же самые интервалы местного времени можно видеть появление области локального понижения DTEC, достигающего величины -20% относительно фонового уровня. Таким образом, можно говорить об обнаружении отрицательной аномалии за сутки до землетрясения, в то время как в предшествующие дни наблюдалась положительная аномалия.

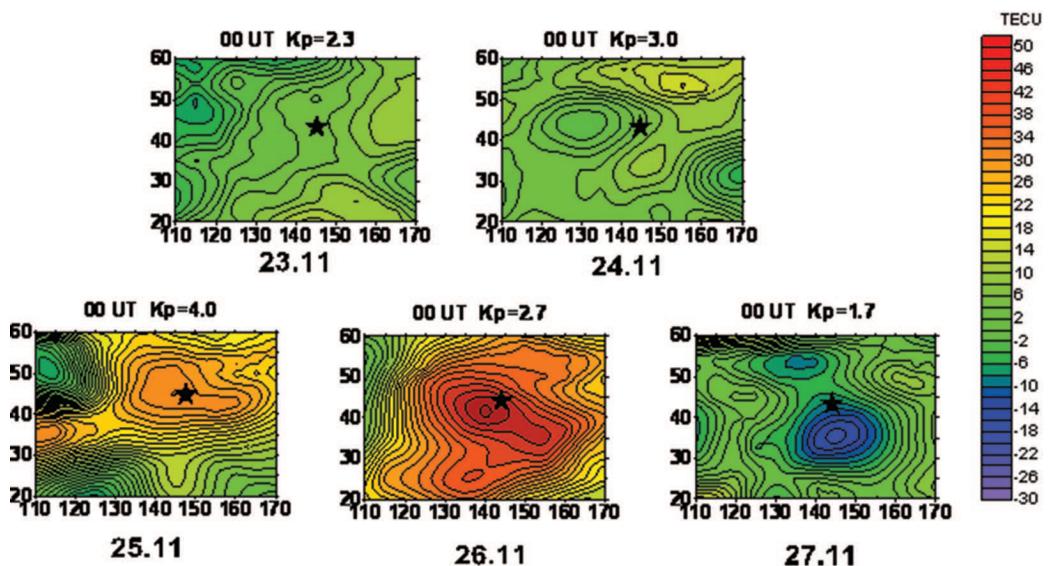


Рис. 6. Дифференциальные ТЕС карты (%) для 23–27 ноября 2004 г.
Звездочкой отмечен эпицентр землетрясения

Заключение

Анализ вариаций ТЕС для ближайших к эпицентру GPS-станций, а так же ближайшей к эпицентру станции вертикального зондирования ионосфера показал наличие значительных отклонений в суточной вариации foF2 и ТЕС за несколько дней до землетрясения. Аномалия проявилась в виде специфического повышения электронной концентрации в суточном ходе в дневное время. Значительное повышение значений ТЕС на 4–6 ТЕСУ наблюдалось за 1–4 дня перед землетрясением, в частности 26 ноября в интервале 9–12 LT (0–3 UT) повышение ТЕС — 35–40 % относительно фоновых значений. Анализ дифференциальных ТЕС-карт позволил выявить, что область значительного аномального повышения значений ТЕС (свыше 35 % от фоновых величин) имела размеры около 2500 км по долготе и 1500 км по широте. Область максимального повышения (47–50 %) локализована в непосредственной близости от эпицентрального района. Характеристики обнаруженного ионосферного эффекта находятся в согласии с основными характеристиками сейсмоионосферных эффектов, изложенных в (Краткосрочный..., 1999; Pulinets et al., 2003; Pulinets, Boyarchuk, 2004). Кроме того, данные результаты хорошо согласуются с характеристиками сейсмоионосферных эффектов, полученных ранее (Zakharenkova et al., 2008) для землетрясения на Хоккайдо 25 сентября 2003 г. (магнитуда 8,3).

В настоящее время одной из главных гипотез, объясняющих подобные эффекты, является предположение о наличии электрических полей сейсмогенной природы (Rapoport et al., 2004; Pulinets, Boyarchuk, 2004). Такие поля могут возникать над зоной подготовки землетрясения и способны проникать на ионосферные высоты, вызывая изменения различных параметров ионосферной плазмы. В частности, в работе (Намгаладзе и др., 2009) предложен физический механизм возникновения областей повышенного или пониженного полного электронного содержания в ионосфере, наблюдаемых перед сильными землетрясениями. Главным фактором формирования возмущений ТЕС является вертикальный перенос плазмы F2-области ионосферы под действием зонального электрического поля. В случаях повышений ТЕС в средних широтах это поле должно быть восточным, создавая направленную вверх составляющую электромагнитного дрейфа плазмы. Перенос плазмы вверх в средних широтах увеличивает электронную концентрацию за счёт замедления скорости потерь ионов O. Авторами предложена картина пространственного распределения потенциала сейсмогенного электрического поля и проведено моделирование сейсмоионосферных эффектов с использованием глобальной теоретической мо-

дели ГСМ ТИП. Результаты моделирования качественно подобны обнаруженным нами и рядом других авторов эффектам в вариациях электронной концентрации ионосферы. Несмотря на это, процессы в системе литосфера – атмосфера – ионосфера достаточно сложны, физические механизмы взаимодействий в ней не до конца определены и требуют дальнейшего комплексного исследования с привлечением широкого набора средств диагностики атмосферы и ионосферы.

Авторы выражают благодарность IGS сообществу за предоставление GPS-данных, а также National Institute of Information and Communications Technology (NICT) в Японии за предоставление ионозондовых данных.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ № МК-2058.2011.5.

Литература

1. Гохберг М.Б., Кустов А.В., Липеровский В.А., Липеровская Р.Х., Харин Е.П., Шалимов С.Л. О возмущениях в F-области ионосферы перед сильными землетрясениями // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1988. № 4. С. 12–20.
2. Краткосрочный прогноз катастрофических землетрясений с помощью радиофизических наземно-космических методов / Под ред. В.Н. Страхова, В.А. Липеровского. М.: ОИФЗ РАН, 1999. 176 с.
3. Липеровский В.А., Похомелов О.А., Шалимов С.А. Ионосферные предвестники землетрясений. М.: Наука, 1992. 304 с.
4. Намгагадзе А.А., Клименко М.В., Клименко В.В., Захаренкова И.Е. Физический механизм и математическое моделирование ионосферных предвестников землетрясений, регистрируемых в полном электронном содержании // Геомагнетизм и аэрономия. Март-Апрель 2009. Т. 49. № 2. С. 267–277.
5. Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes / Ed. Hayakawa M. Tokyo: Terra Scientific Publishing Company, 1999. 996 p.
6. Baran L.W., Shagimuratov I.I., Tepenitsina N.J. The use of GPS for ionospheric studies // Artificial Satellites. 1997. V. 32(1). P. 49–60.
7. Davies E., Baker D.M. Ionospheric effects observed around the time of the Alaskan earthquake of March 28, 1964 // J. Geophysical Research. 1965. V. 70. N. 9. P. 2251–2253.
8. Gaivoronskaya T.V., Zelenova T.I. The effect of seismic activity on F2-layer critical frequencies // Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 1991. V. 53. N. 6/7. P. 649–652.
9. Hernández-Pajares M., Juan J.M., Orús R., García-Rigo A., Feltens J., Komjathy A., Schaer S.C., Krankowski A. The IGS VTEC maps: a reliable source of ionospheric information since 1998 // Special IGS Iss. J. Geodesy. 2009. V. 83(3–4). P. 263–275. doi:10.1007/s00190-008-0266-1.
10. Krankowski A., Baran L.W., Shagimuratov I.I. Modeling and forecasting of TEC obtained with IGS Network over Europe // Proc. Workshop and Symposium. 10 years IGS. March 01–05, 2004. Berne, Switzerland.
11. Leonard R.S., Barnes R.A. Observations of ionospheric disturbances following the Alaska earthquake // J. Geophysical Research. 1965. V. 70. P. 1250–1253.
12. Liu J.Y., Chuo Y.J., Shan S.J., Tsai Y.B., Pulinets S.A., Yu S.B. Pre-earthquake ionospheric anomalies monitored by GPS TEC // Annales de Geophysique. 2004. V. 22. P. 1585–1593.
13. Pulinets S.A., Boyarchuk K. Ionospheric Precursors of Earthquakes. Berlin: Springer, 2004. 315 p.
14. Pulinets S.A., Legen'ka A.D., Gaivoronskaya T.V., Depuev V.Kh. Main phenomenological features of ionospheric precursors of strong earthquakes // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2003. V. 65. P. 1337–1347.
15. Rapoport Y., Grimalsky V., Hayakawa M., Ivchenko V., Juarez R.-D., Koshevaya S., Gotyngyan O. Change of ionospheric plasma parameters under the influence of electric field which has lithospheric origin and due to radon emanation // Physics and Chemistry of the Earth. 2004. V. 29. P. 579–587.
16. 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. 2007. V. 51(2). P. 267–278.
17. 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. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2008. V. 70. P. 1919–1928.

Use of signals of global navigational systems GPS/GLONASS for monitoring of the seismo-ionospheric effects

I.E. Zakharenkova, Iu.V. Cherniak, I.I. Shagimuratov

*West Department of IZMIRAN,
236010, Kaliningrad, Av. Pobeda, 41,
e-mail: zakharenkova@mail.ru*

In the given paper there are presented results of analysis of the total electron content (GPS TEC) variations prior to the Japanese earthquake which took place on November 28, 2004. It was revealed the occurrence of the specific seismoionospheric anomaly in the form of local TEC enhancement. The increase of electron concentration reached the value of 40-50% relative to the quiet geomagnetic conditions. For detailed analysis it was considered GPS TEC data obtained for GPS stations located at different distances from the epicenter position, as well as the data of ground-based vertical sounding station.

Keywords: seismoionospheric effects, GPS, GLONASS, total electron content.