

В. В. Хижняк¹, В. П. Деденок², А. А. Ткаченко²

¹ Український науково-дослідний інститут цивільного захисту Міністерства надзвичайних ситуацій України, Київ

² Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

ИОНОСФЕРНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ ПЕРЕД СИЛЬНЫМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ НА ГАИТИ ($M = 7.2$) И В ЯПОНИИ ($M = 9.0$) ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

На основі оцінок іоносферних затримок супутникових навігаційних радіосигналів за даними мережі станцій системи IGS проведено аналіз іоносферних варіацій над епіцентраторами двох сильних землетрусів на Гаїті в січні 2010 р. ($M = 7.2$) і в Японії у березні 2011 р. ($M = 9.0$). Виявлено характерні особливості змін стану локальної епіцентральної області іоносфери, спільні для підготовчого періоду обох землетрусів.

ВВЕДЕНИЕ

Землетрясения на Гаїті в январе 2010 г. ($M = 7.2$) и в Японии в марте 2011 г. ($M = 9.0$) стали одними из наиболее сильных землетрясений последнего времени. Они повлекли за собой значительные человеческие жертвы и разрушения. Катастрофические последствия сильных землетрясений делают исключительно актуальными исследования по выявлению предвестников таких сейсмических событий. Одним из направлений развития методов прогнозирования является изучение сейсмо-ионосферных эффектов [8], в частности тех, которые могут быть ассоциированы с подготовкой землетрясений. Исследователи отмечают, что часто в период от нескольких часов до нескольких суток до землетрясения в эпицентralной области ионосферы регистрируются аномалии, которые проявляются как специфические изменения либо полного содержания электронов в вертикальном столбе единичного сечения (VTEC) [5, 7, 9–13], либо максимума электронной концентрации в F2-слое ионосферы [2, 3, 6].

Выявление локальных ионосферных аномалий, ассоциированных с землетрясениями, за-

частую затруднено, поскольку ионосферные возмущения могут вызываться многими факторами, основными из которых являются солнечная активность и состояние магнитосферы Земли — факторы глобального влияния на ионосферу. Возмущения от этих факторов могут быть сильнее возмущений, связанных с тектоническими процессами и скрывать их. Так, например, в исследовании [1] не удалось выявить сейсмоионосферные предвестники землетрясения Hector Mine 16 октября 1999 г. в Калифорнии ($M = 7.1$) на фоне относительно высокой солнечной и геомагнитной активности.

Для преодоления таких трудностей в работе [6] предложен подход, позволяющий при возмущенной геомагнитной обстановке разделить сейсмические и геомагнитные эффекты воздействия на ионосферу. Для этого предложено использовать сравнительный анализ данных о состоянии ионосферы в эпицентralной и в удаленной от эпицентра (фоновой) областях. Такой подход позволил выделить локальные ионосферные аномалии в районе эпицентра землетрясения Hector Mine, которые не связаны с геомагнитной обстановкой и могут быть ассоциированы с эффектами сейсмического происхождения.

Поведение ионосферы перед землетрясениями на Гаїті и в Японії исследовано в ряде ра-

бот. В работе [12] авторы на основе анализа глобальных ионосферных карт показали наличие ионосферных возмущений в эпицентральной области землетрясения на Гаити за несколько суток до события. В работе [9] авторы рассматривали только очень короткий (несколько часов до и после землетрясения) временной интервал, показав наличие ионосферной аномалии непосредственно (десятки минут) перед землетрясением. Методики, использованные в работах [9, 12], хоть и позволяют показать наличие ионосферного отклика на тектоническую активность, не могут быть использованы для сколько-нибудь заблаговременного предсказания, поскольку требуют либо наличия ионосферных карт, которые формируются с задержкой в несколько суток, либо рассчитаны на обработку данных после землетрясения.

При обработке измерений глобальных спутниковых навигационных систем (ГНСС) одним из основных источников погрешности измерения псевдодальности является ионосферная задержка навигационного радиосигнала, которая однозначно связана с полным электронным содержанием ионосферы вдоль трассы «спутник — приемник» и может быть оценена из двухчастотных ГНСС-измерений. Так как эта задержка однозначно связана с VTEC, в работе [4] предложена методика оценки текущего состояния локальной пространственно-временной области ионосферы на основе оценки ионосферной задержки навигационного радиосигнала вдоль вертикального луча, приведенной к единицам длины (ΔI_v). Эта методика позволяет организовать непрерывный мониторинг и выявления неоднородностей ионосферы путем «сканирования» достаточно большого региона ионосферы ограниченным числом ГНСС-станций.

Целью работы является анализ вариаций в локальной эпицентральной области ионосферы в подготовительный период двух сильных землетрясений на основе методики оценки текущего состояния локальной пространственно-временной области ионосферы на основе оценок ΔI_v по данным сети ГНСС-станций [4]. Для оценки влияния факторов глобального воздействия на ионосферу авторы использовали подход, пред-

ложенный в работе [6], при котором одновременно исследуются эпицентральная и фоновая области ионосферы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Данные о времени, мощности и координатах эпицентров землетрясений были взяты на сайте научного агентства The United States Geological Survey (USGS) (<http://earthquake.usgs.gov/>). Землетрясение на Гаити с магнитудой 7.2 по шкале Рихтера было зафиксировано 12 января 2010 г. в 21:53 UTC. Географические координаты эпицентра 18.46° с. ш., 72.53° з. д. Землетрясение в Японии с магнитудой 9.0 было зафиксировано 11 марта 2011 г. в 05:46 UTC, координаты эпицентра 38.32° с. ш., 142.37° в. д.

Согласно методике [4] ионосфера представляется в виде тонкого слоя на высоте $H_i = 400$ км. В каждом случае исследуемые области ионосферы (эпицентральная Ω_i и фоновая Ω_ϕ) ограничены окружностью радиуса 400 км. Центр Ω_i находится над эпицентром, а центр Ω_ϕ — над выбранной станцией, удаленной от эпицентра на достаточное расстояние.

Исходными данными для проведения исследований были посutoчные измерения и навигационные файлы станций системы International GNSS Service (IGS), доступные на сайте www.igscb.jpl.nasa.gov. Значения межканальных задержек аппаратуры спутников ГНСС и станций IGS взяты из файлов глобальных ионосферных карт от Center for Orbit Determination in Europe (<ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE>). Интервал времени, на котором производилась оценка текущих значений $\Delta \bar{I}_v$, согласно методике [4], составлял $T_i = 90$ мин.

При анализе состояния ионосферы рассматривались вариации оценок ионосферной задержки $\Delta \bar{I}_v$ относительно их средних значений \bar{I}_v (для соответствующего времени суток)

$$\delta I_v = \Delta \bar{I}_v - \bar{I}_v,$$

что позволило определить пределы вариаций $\Delta \bar{I}_v$ относительно средних значений на длительном интервале задолго до землетрясения при относительно невозмущенной ионосфере, т. е. найти такое L_c , при котором

$$|\delta I_v| \leq L_c.$$

Значение L_c характеризует предел нормальной вариабельности δI_v , а выход за этот предел рассматривается как аномальное изменение δI_v .

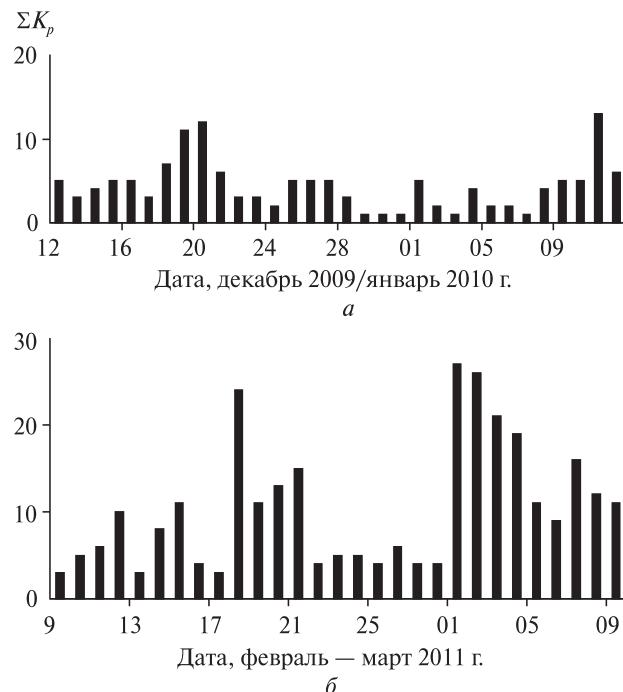
Анализ геомагнитной обстановки перед землетрясениями и выбор фоновых областей. Анализ геомагнитной обстановки на 30-сут интервале перед землетрясениями был проведен на основе данных лаборатории рентгеновской астрономии Солнца физического института Российской академии наук (www.thesis.lebedev.ru). В качестве показателя состояния магнитосферы рассматривались посуточные суммы K_p -индексов.

Геомагнитная обстановка перед землетрясением на Гаити ($M = 7.2$) была спокойной, магнитных бурь зафиксировано не было. Геомагнитная обстановка перед землетрясением в Японии ($M = 9.0$) была также относительно спокойной. В рассматриваемом периоде были зафиксированы слабые магнитные бури 18 февраля и 1 марта. На рис. 1 показаны посуточные суммы K_p -индексов для рассматриваемых землетрясений.

Для оценки влияния на состояние ионосфера факторов глобального характера проводилось исследование ионосферных вариаций в «фоновых» областях ионосферы. При этом полагалось, что факторы глобального характера воздействуют на ионосферу одинаково как в эпицентральной, так и в фоновой областях.

Выбор фоновой области является достаточно сложной задачей, где необходимо учитывать удаленность от эпицентра, природу самого землетрясения (океаническое или континентальное) и др. Проведенное исследование опиралось на измерительную информацию станций системы IGS, поэтому и выбор фоновых областей был обусловлен расположением IGS-станций, по которым была доступна вся необходимая информация (значения межканальных задержек, файлы измерений, навигационные файлы и др.).

Анализ ионосферных аномалий в подготовительный период сильного землетрясения на Гаити ($M = 7.2$). Для исследования ионосферных вариаций в эпицентральной области землетрясения на Гаити использовались измерения станций CRO1 и SCUB системы IGS. Другие станции не использовались, поскольку по ним не было достоверных данных о значениях межчастотной



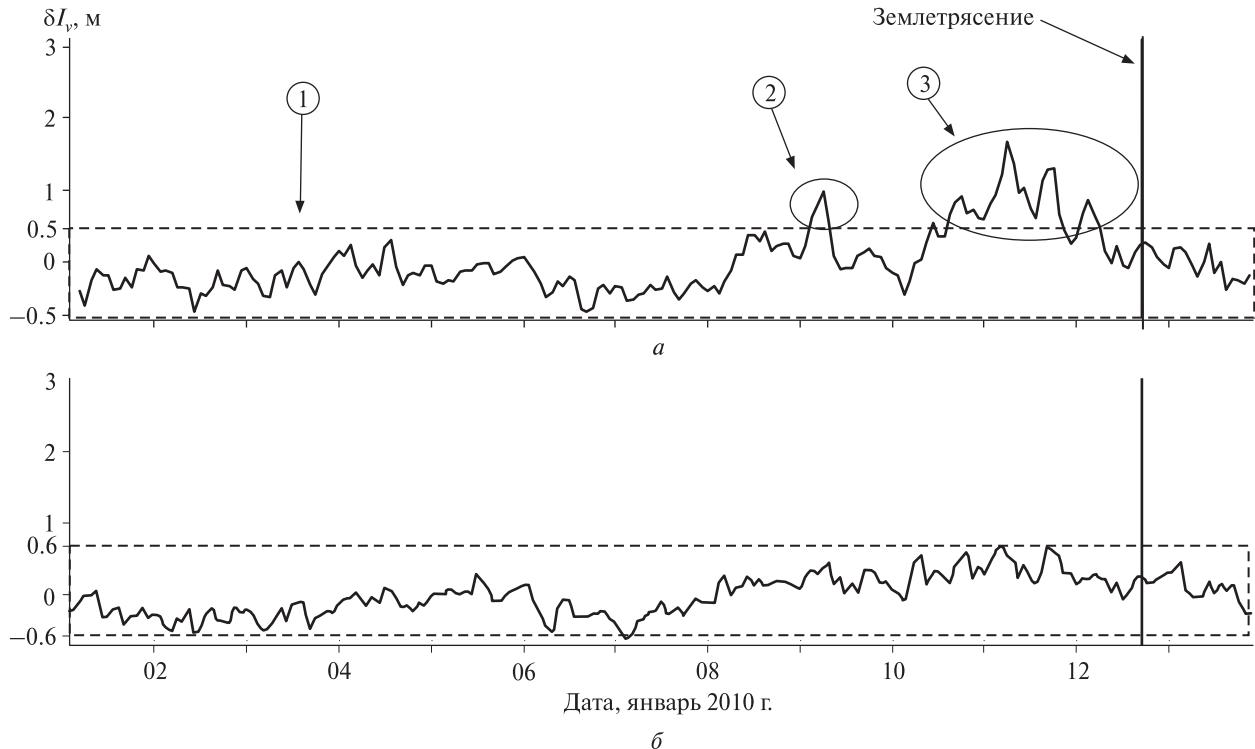


Рис. 3. Ионосферные вариации над эпицентром землетрясения на Гаити (*a*) и в фоновой области (*b*)

задержки. В качестве фоновой была выбрана область ионосферы Ω_ϕ над станцией BRMU (расстояние от эпицентра около 1800 км). Взаимное расположение станций и областей Ω_i и Ω_ϕ показано на рис. 2.

На рис. 3 показан график изменения δI_v в эпицентральной и фоновой областях. Анализ этих данных показал, что в спокойный период (до 9 января) в эпицентральной области Ω_i абсолютное значение отклонения текущей оценки $\hat{\Delta}I_v$ от среднего значения не превышает 0.5 м (область 1, рис. 3, *a*), т. е. в этом случае

$$L_c = 0.5 \text{ м.}$$

На рассвете 9 января (за 3.5 сут до события) наблюдается резкое однократное увеличение значений δI_v (область 2, рис. 3, *a*) на 0.5 м (около 100 %) относительно L_c . А с вечера 10 января и практически до землетрясения (12 января) отмечено стабильное увеличение значений δI_v до 0.8...1.5 м (на 50...200 % больше L_c) в утреннее и вечернее время (область 3, рис. 3, *a*). Максималь-

ное значение δI_v отмечено на рассвете 11 января за 1.5 сут до землетрясения. Непосредственно перед землетрясением значения δI_v уменьшились до уровня невозмущенной ионосферы.

В фоновой области Ω_ϕ (рис. 3, *b*) в период до 9 января абсолютное значение отклонения текущей оценки $\hat{\Delta}I_v$ от среднего значения не превышает около 0.6 м. В период от 9 января до землетрясения (когда в области Ω_i зарегистрированы возмущения) вариации δI_v также практически не выходят за пределы 0.6 м. То есть, ионосфера в фоновой области сохраняла стабильное состояние на всем времени исследования и значения δI_v практически не выходили за пределы нормальной вариабельности.

Анализ данных рис. 3 показал, что аномальные (выходящие за пределы нормальной вариабельности) изменения значений δI_v в эпицентральной области ионосферы носят локальный характер, не связаны с влиянием факторов глобального характера и могут быть ассоциированы с подготовительным периодом землетрясения.

Полученные результаты хорошо согласуются с результатами исследования ионосферных аномалий, ассоциированных с землетрясением в Гаити, изложенными в [12].

Анализ ионосферных аномалий перед землетрясением в Японии ($M = 9.0$). При исследовании использовались данные станций системы IGS, расположенные в Японии — MIZU, USUD, MTKA и TSKB. В качестве фоновой была выбрана область ионосферы Ω_ϕ над станцией YAKT (расстояние от эпицентра около 3000 км). Взаимное расположение областей Ω_i и Ω_ϕ показано на рис. 4.

Вариации δI_v в эпицентральной области в подготовительный период землетрясения показаны на рис. 5, а. Их анализ показал, что задолго до землетрясения (с 12 февраля до 3 марта) величина δI_v находится в пределах ± 1 м (область 1), т. е. в этом случае

$$L_c = 1 \text{ м.}$$

Вариации δI_v в период от 3 марта до землетрясения более детально показаны на рис. 5, б. В дневное время 3 марта (за 8 сут до события) наблюдалось резкое однократное увеличение значения δI_v (область 2 на рис. 5, а, б) на 0.5 м (примерно на 50 %) относительно L_c . С 6 марта по 10 марта (область 3 на рис. 5, а, б) отмечено стабильное увеличение значений δI_v на 0.5...1 м (50...100 % относительно L_c) в дневное время с максимумом 8 марта (за 3 сут до землетрясения). В окрестностях момента землетрясения также отмечается увеличение δI_v примерно на 1 м, что хорошо согласуется с результатами, полученными в работе [9].

Вариации значений δI_v в области Ω_ϕ на рассматриваемом интервале времени показаны на рис. 5, в. На интервале с 12 февраля до 3 марта величина δI_v находится в пределах ± 1 м (область 1). В период от 3 января до землетрясения (когда в области Ω_i зарегистрированы возмущения) вариации δI_v также практически не выходят за пределы ± 1 м. То есть, можно утверждать, что как и в случае землетрясения на Гаити, ионосфера в фоновой области сохраняла стабильное состояние на всем времени исследования, и значения δI_v практически не выходили за пределы нормальной вариабельности.

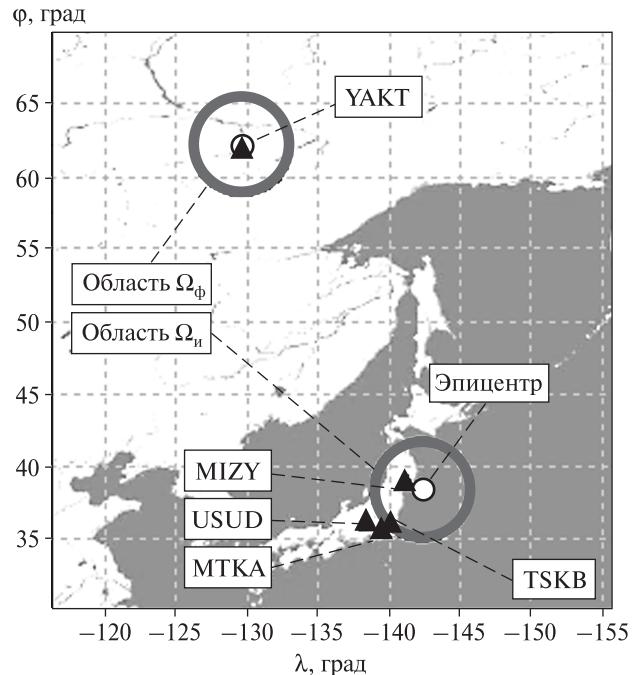


Рис. 4. Схема исследования ионосферы перед землетрясением в Японии

Таким образом, на фоне относительно спокойной геомагнитной обстановки в локальной эпицентральной области ионосферы показано наличие возмущений, которые могут рассматриваться как ионосферный отклик на сейсмическую активность.

Характерные особенности вариаций ионосферы в подготовительный период землетрясений. Полученные результаты показывают, что подготовительный период обоих землетрясений характеризуется появлением возмущений в локальной эпицентральной области ионосферы. Учитывая относительно спокойную геомагнитную обстановку и фактическое отсутствие ионосферных возмущений в фоновых областях, отмеченные аномалии ионосферы в эпицентральной области могут быть ассоциированы с подготовкой обоих землетрясений.

Полученные результаты позволили выявить общие свойства изменчивости ионосферы в подготовительный период обоих землетрясений. В период относительно спокойной ионосферы (задолго до землетрясения при спокойной геомаг-

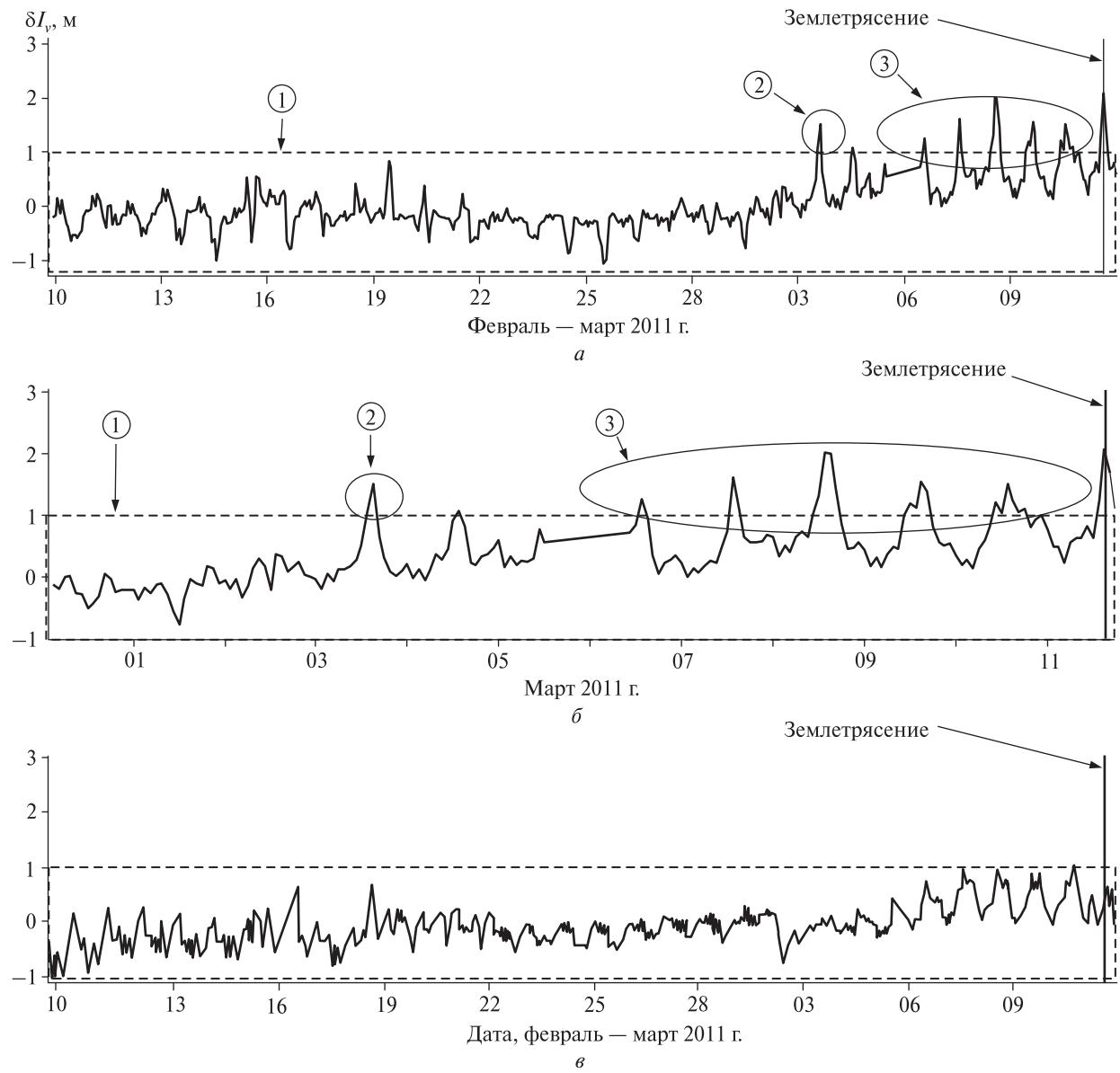


Рис. 5. Ионосферные вариации в эпицентralной области землетрясения в Японии на полном интервале исследования (а) и непосредственно перед событием (б), а также в фоновой области (в)

нитной обстановке) абсолютные значения δI_v не превышают некоторого значения L_c , которое в каждом случае разное, но некоторым образом характеризует пределы нормальной изменчивости δI_v «день-ото-дня» в рассматриваемой области. За 3.5...8 сут до события отмечается однократное увеличение значений δI_v примерно на 0.5 м (50...100 %) больше L_c . Затем следуетperi-

од (1.5...3 сут), когда значения δI_v соответствуют невозмущенной ионосфере и не выходят за пределы L_c . За 2...5 сут до землетрясения отмечаются периодические (12...24 ч) выбросы значений δI_v на 0.5...1 м (50...200 %) больше L_c с максимумом за 1.5...3 сут до события.

Введем величину «период возмущения» T_b , характеризующий минимальный интервал вре-

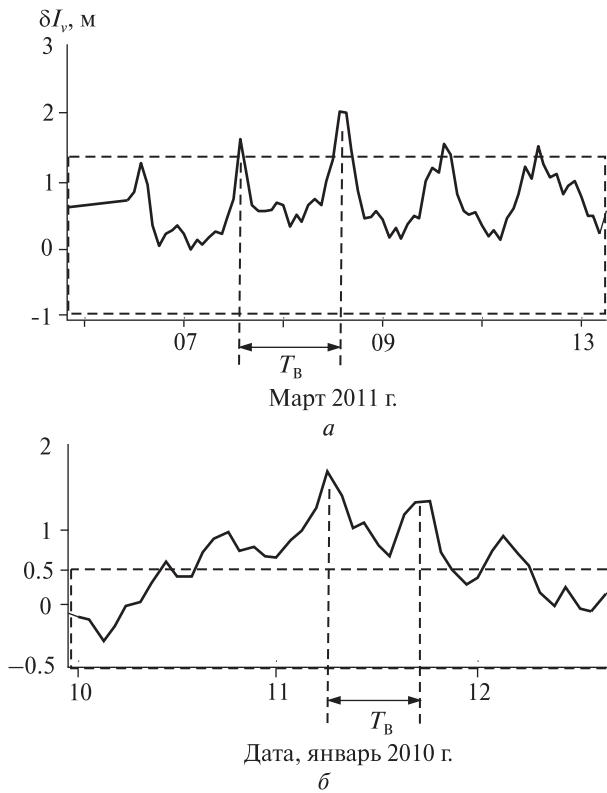


Рис. 6. К пояснению понятия «период возмущения» $T_{\text{в}}$ при подготовке землетрясений в Японии (a) и на Гаити (б)

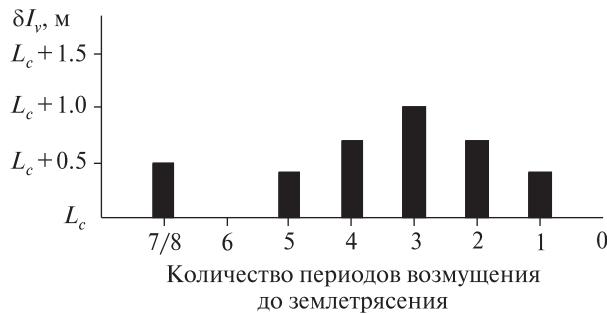


Рис. 7. Схематическое отображение вариаций ионосфера перед сильными землетрясениями на Гаити и в Японии (0 — момент землетрясения)

мени между последовательными локальными максимумами значений δI_v . В общем случае значения $T_{\text{в}}$ могут быть разными для разных землетрясений, что может быть связано с природой их возникновения. Так, в случае землетрясения в Японии $T_{\text{в}} \approx 1$ сут, а для землетрясения на Гаити $T_{\text{в}} \approx 12$ ч (рис. 6).

Если значение $T_{\text{в}}$ использовать в качестве единицы измерения времени, то поведение ионосферы в подготовительный период обоих землетрясений может быть описано единой схемой, представленной на рис. 7.

За семь-восемь периодов $T_{\text{в}}$ до события отмечается однократное превышение порога L_c приблизительно на 0.5 м. За пять периодов до события начинается серия превышений порога с нарастающей и затем спадающей амплитудой с максимумом на 1 м, превышающим L_c за три периода до события.

Отмеченные общие закономерности ионосферных вариаций накануне сильных землетрясений могут оказаться весьма полезными для формализации методов ионосферного мониторинга в сейсмоопасных регионах.

ВЫВОДЫ

Таким образом, с использованием методики оценки текущего состояния локальной пространственно-временной области ионосферы по данным сети станций приема сигналов ГНСС [4], проведен анализ ионосферных вариаций в подготовительный период сильных землетрясений на Гаити в 2010 г. ($M = 7.2$) и в Японии в 2011 г. ($M = 9.0$). На фоне относительно спокойной геомагнитной обстановки и фактическом отсутствии возмущений в фоновых областях показаны как наличие ионосферных аномалий над эпицентрами за несколько суток до события, так и схожий характер вариаций ионосферы в обоих случаях.

Использованная методика позволяет организовать мониторинг состояния ионосферы и обнаружение подобных аномалий в сейсмоопасных районах ограниченным количеством станций в масштабе времени, близком к реальному. Такой мониторинг может рассматриваться как элемент комплекса мероприятий по предсказанию сильных землетрясений.

1. Аффраймович Э. Л., Астафьева Э. И., Гохберг М. Б. и др. Поиски предвестников землетрясений в вариациях полного электронного содержания в ионосфере по данным GPS во время землетрясения НЕСТОР MINE 16 октября 1999 г. // 3 Междунар. конф. «Сол-

- нечно-земные связи и электромагнитные предвестники землетрясений». — М.: Ин-т космофиз. исслед. и распространения радиоволн РАН, 2004. — Том 1. — С. 3–18.
2. Бондур В. Г., Смирнов В. М. Ионосферные возмущения в период подготовки сейсмических событий по данным спутниковых навигационных систем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Сб. науч. ст. — М.: ИКИ РАН, 2006. — Том II, вып. 3. — С. 190–197.
3. Бондур В. Г., Смирнов В. М. Мониторинг ионосферных предвестников цунамигенных землетрясений по данным спутниковых навигационных систем // Proc. of 31st Int. Symp. on Remote Sensing of Environment. — St. Petersburg, 2005. — P. 190–197.
4. Деденок В. П., Ткаченко А. А., Дайнеко В. М., Резников Ю. В. Мониторинг возмущений в локальной пространственно-временной области ионосферы по данным сети станций приема спутниковых радионавигационных сигналов // Космічна наука і технологія. — 2011. — 17, № 6. — С. 68–73.
5. Захаренкова И. Е., Шагимуратов И. И., Лаговский А. Ф., Кранковский А. Вариации полного электронного содержания ионосферы во время Калининградского землетрясения 21 сентября 2004 г. // Вестник МГТУ. — 2006. — 9, № 3. — С. 434–439.
6. Смирнов В. М., Смирнова Е. В. Детектирование сейсмоионосферных вариаций в период геомагнитных возмущений по данным навигационных систем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — М.: Изд-во ООО «Азбука-2000», 2006. — Том 2, вып. 3. — С. 242–246.
7. Dedenok V., Tkachenko A. Monitoring of ionosphere perturbations preceding high intensive earthquakes on data from satellite radio navigation signal receiver network // Natural Cataclysms and Global Problems of the Modern Civilization: Abstracts of the Internat. Congress. — Istanbul, Turkey, 2011. — P. 40–41.
8. Hayakawa M., Molchanov O. A. Seismo-Electromagnetics: Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere // TERRAPUB, Tokyo, Japan. — 2002. — 313 p.
9. Heki K. Ionospheric electron enhancement preceding the 2011 Tohoku-Oki earthquake // Geophys. Res. Lett. — 2011. — 38. — P. L17312. — 5 p.
10. Liu J., Chen S., Chen Y., et al. Seismo-Ionospheric Precursors of the 26 December 2006 M 7.0 Pingtung Earthquake Doublet // Terrestrial atmospheric and oceanic sciences. — 2008. — 19, N 6. — P. 751–759.
11. Liu J. Y., Chuo Y. J., Shan S. J., et al. Pre-earthquake ionospheric anomalies registered by continuous GPS TEC measurement // Ann. geophys. — 2004. — 22. — P. 1585–1593.
12. Liu J. Y., Le H., Chen Y. I., et al. Observations and simulations of seismoionospheric GPS total electron content anomalies before the 12 January 2010 M7 Haiti earthquake // J. Geophys. Res. — 2011. — 116. — A04302, doi:10.1029/2010JA015704. — 9 p.
13. Saroso S., Liu J., Hattori K., Chen C. Ionospheric GPS TEC anomalies and $M > 5.9$ earthquakes in Indonesia during 1993 — 2002 // Terrestrial atmospheric and oceanic sciences. — 2008. — 19. — P. 481–488.

Надійшла до редакції 01.03.12

V. V. Khizhniak, V. P. Dedenok, A. O. Tkachenko

IONOSPHERIC DISTURBANCES BEFORE
THE GREAT EARTHQUAKES IN HAITI ($M = 7.2$)
AND JAPAN ($M = 9.0$) FROM DATA
OF SATELLITE RADIONAVIGATION SYSTEMS

Using estimates for ionospheric delays of radio navigation signals from a network of IGS stations, we analysed ionospheric variations over the epicenters of two great earthquakes: in Haiti in January 2010 ($M = 7.2$) and in Japan in March 2011 ($M = 9.0$). Some characteristic features, which were common for both earthquakes, were revealed for changes in the local ionosphere region state over the epicenters of the earthquakes.