

УДК 550.388.2

В. П. Деденок¹, А. А. Ткаченко², В. М. Дейнеко², Ю. В. Резников²

¹ Науково-дослідний проектний інститут «Союз», Харків

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

МОНИТОРИНГ ВОЗМУЩЕНИЙ В ЛОКАЛЬНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ СЕТИ СТАНЦИЙ ПРИЕМА СПУТНИКОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

Запропоновано методику використання оцінки іоносферної затримки навігаційних радіосигналів для моніторингу стану іоносфери в локальній просторово-часовій області за даними декількох станцій прийому супутникових радіонавігаційних сигналів. Проведено порівняльний аналіз іоносферних варіацій над епіцентром сильного землетрусу в Греції в 2006 р. ($M = 6.8$) з даними відомих досліджень. Наведено результати аналізу стану іоносфери над епіцентром руйнівного землетрусу в Японії у березні 2011 р. ($M = 9.0$).

ВВЕДЕНИЕ

Ионосфера является средой, в которой возникают отклики на целый ряд природных и техногенных событий, таких как сейсмическая активность, магнитные бури, старты ракет-носителей и др. Подобные отклики проявляются в виде различного рода неоднородностей, которые представляют собой области аномального изменения концентрации электронов. Так, многими исследователями [1, 4, 7, 8] показано появление ионосферных аномалий над эпицентром мощных землетрясений в предшествующий период (от нескольких часов до нескольких суток), которые проявляются как специфическое увеличение полного электронного содержания в вертикальном столбе единичного сечения (VTEC). Мониторинг появления таких аномалий может стать эффективным элементом комплекса мероприятий по предсказанию землетрясений при обеспечении его непрерывности и, как минимум, регионального масштаба охвата ионосферы.

Наземные методы измерений, как правило, не позволяют проводить длительные и непре-

рывные наблюдения состояния ионосферы. Эта проблема может быть решена при помощи спутниковых радионавигационных систем (СРНС), позволяющих осуществлять постоянный глобальный мониторинг состояния ионосферы методом радиопросвечивания по трассе «навигационный спутник — наземный приемник» [3]. В настоящее время сеть наземных GPS-станций обеспечивает одновременное глобальное покрытие и получение непрерывных измерений с высоким временным и пространственным разрешением. Данные их измерений размещены на сайте <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/data>.

Одним из наиболее чувствительных к сейсмической активности параметров ионосферы является электронная концентрация $NmF2$ в максимуме слоя $F2$. Определение высотного распределения электронной концентрации является достаточно сложной, хотя и решаемой задачей [5]. При мониторинге общего состояния ионосферы, как правило, нет необходимости проводить «тонкий» анализ высотного распределения электронной концентрации, и для оценки состояния ионосферы часто используется значение VTEC, которое достаточно чутко реагирует на изменения $NmF2$, коэффициент корреляции

между VTEC и NmF2 достигает 0.9 [4]. Для анализа ионосферных вариаций могут быть использованы другие параметры, однозначно связанные с VTEC, например ионосферная задержка радиосигнала вдоль вертикального луча, приведенная к единицам длины (ΔI_v) [2].

При обработке GPS-измерений исследователями широко используется методика, позволяющая получить абсолютные величины задержек и восстановить суточную вариацию TEC над одной станцией [6]. При этом суточная вариация получается посредством осреднения TEC по достаточно большой пространственной области ионосферы (радиус около 1000 км). Однако неравномерность распределения станций приема сигналов СРНС на земной поверхности не позволяет сколько-нибудь уверенно гарантировать близость эпицентра вероятного землетрясения к одной из станций, а большой радиус охвата ионосферы может «поглотить» аномалию меньшего размера.

В связи с этим актуальной является разработка методики оценки состояния локальной пространственно-временной области ионосферы, имеющей произвольные размеры и расположение в зоне действия сети станций приема. Это позволит организовать «сканирование» целого региона ионосферы ограниченным числом станций, что, в свою очередь, даст возможность полноценного мониторинга и выявления неоднородностей ионосферы.

Цель работы – разработка методики определения состояния локальной пространственно-временной области ионосферы по данным нескольких пунктов приема спутниковых радионавигационных сигналов, сравнение результатов применения метода с известными данными исследований по анализу ионосферных вариаций перед сильным землетрясением.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ЛОКАЛЬНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ

Модель ионосферы. Локальная пространственная область ионосферы аппроксимируется в виде тонкого слоя, расположенного на фиксированной высоте H_{ii} (рис. 1). Это означает, что все сво-

бодные заряженные частицы концентрируются в тончайшем слое на одной высоте, т. е. интегральное содержание электронов вдоль трассы распространения сигнала от спутника S до приемника P (ТЕС) сосредоточено в точке прокола X . Для пересчета ТЕС (вдоль трассы сигнала) в вертикальный (луч OX) используется геометрический фактор

$$VTEC = TEC \cdot \cos z. \quad (1)$$

С ТЕС однозначно связано значение ионосферной задержки для частоты f (в системе СИ)

$$\Delta I = \frac{40.3}{f^2} TEC.$$

Приемником сигналов СРНС производятся одномоментные измерения псевдодальностей до каждого видимого спутника D_1, D_2 на частотах $f_{L1}=1575$ МГц и $f_{L2}=1228$ МГц радионавигационных сигналов GPS. Значения ионосферной задержки для частоты f_{L1} , рассчитанные из двухчастотных измерений, равны

$$\Delta I = \frac{D_1 - D_2 - c(\tau_p + \tau_s)}{1 - \gamma}, \quad (2)$$

где τ_p, τ_s – межчастотные задержки аппаратуры приемника и передатчика соответственно, $\gamma = (f_{L1}/f_{L2})^2$.

Значение ΔI_v для точки прокола X

$$\Delta I_v = \cos z \frac{D_1 - D_2 - c(\tau_p + \tau_s)}{1 - \gamma} \quad (3)$$

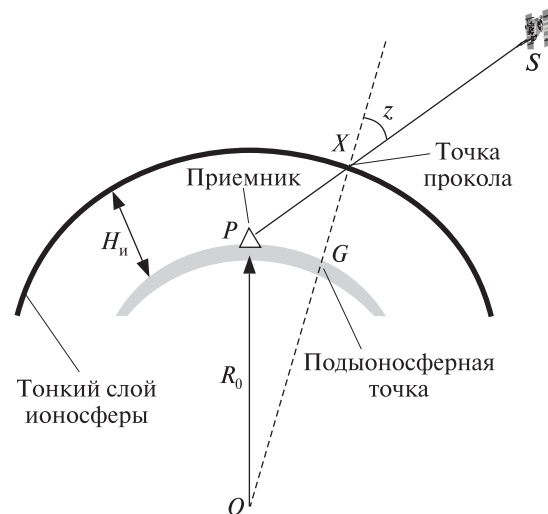


Рис. 1. Однослойная модель ионосферы

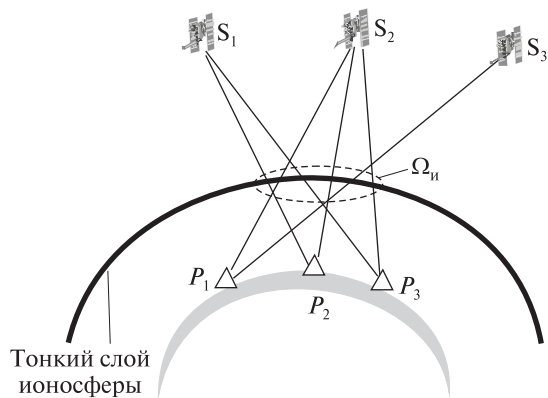


Рис. 2. Схема организации радиопросвечивания локальной области ионосферы

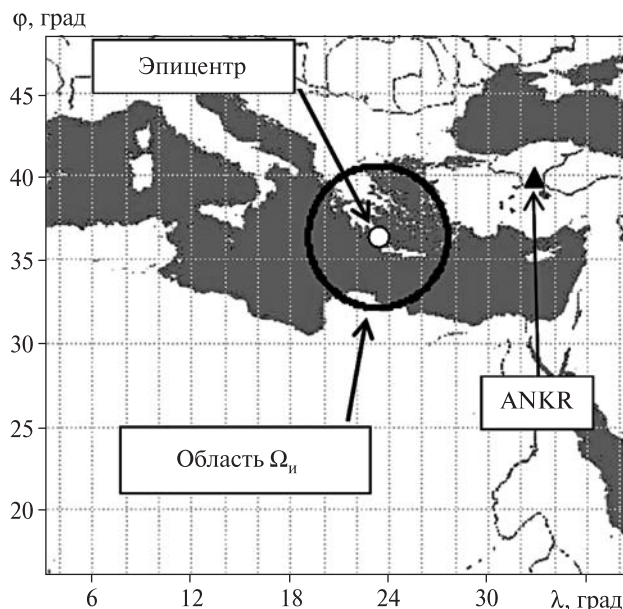


Рис. 3. Схема исследования ионосферы над эпицентром землетрясения в Греции в 2006 г.



Рис. 4. Ионосферные вариации над эпицентром землетрясения в Греции в 2006 г.

рассматривается как обобщенная характеристика состояния ионосферы над подионосферной точкой G и опосредованно отражает величину $VTEC$ над этой точкой.

Методика оценки состояния локальной пространственно-временной области ионосферы. Задаётся некоторая пространственная область ионосферы Ω_u . Полагается, что в пределах этой области на некотором интервале местного времени T_u значения ΔI_v (и следовательно, $VTEC$) одинаковы для любой точки $X \in \Omega_u$. Сигналы СРНС принимаются N_p приемниками с известными значениями τ_p , которые производят измерения псевдодальностей на частотах f_{L1} и f_{L2} . Расположение приемников обеспечивает прохождение трасс сигналов спутников СРНС через Ω_u (рис. 2). Для всех спутников СРНС известны значения τ_s .

При таких условиях оценка $\Delta \hat{I}_v$ представляет собой результат усреднения значений ΔI_v , рассчитанных по формуле (3), для всех трасс «спутник — приемник», проходящих через Ω_u на интервале T_u :

$$\Delta \hat{I}_v(\Omega_u, T_u) = \frac{1}{N_{ps}} \sum_{p=1}^{N_p} \sum_{s=1}^{N_s} \Delta I_{v_{ps}}(t_i), \quad (4)$$

$$X_{ps}(t_i) \in \Omega_u, \quad t_i \in T_u, \quad (5)$$

где $\Delta I_{v_{ps}}(t_i)$ — значение ΔI_v на частоте f_{L1} для трассы от s -го спутника до p -го приемника в момент времени t_i ; X_{ps} — точка прокола тонкого слоя ионосферы для этой трассы; N_{ps} — количество трасс сигналов, для которых выполняются условия (5).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализ ионосферных вариаций в подготовительный период сильного землетрясения ($M = 6.8$) в Греции. В работе [4] был проведен анализ вариаций $VTEC$ для сильного (магнитуда 6.8) землетрясения в Греции, которое было зафиксировано 8 января 2006 г. в 11.35 UT. Географические координаты эпицентра 36.30° с. ш., 23.36° в. д. Геомагнитная активность в течение рассматриваемого периода времени была слабой и мало изменялась. Было выявлено специфическое аномальное состояние ионосферы 7 января, за сутки до землетрясения.

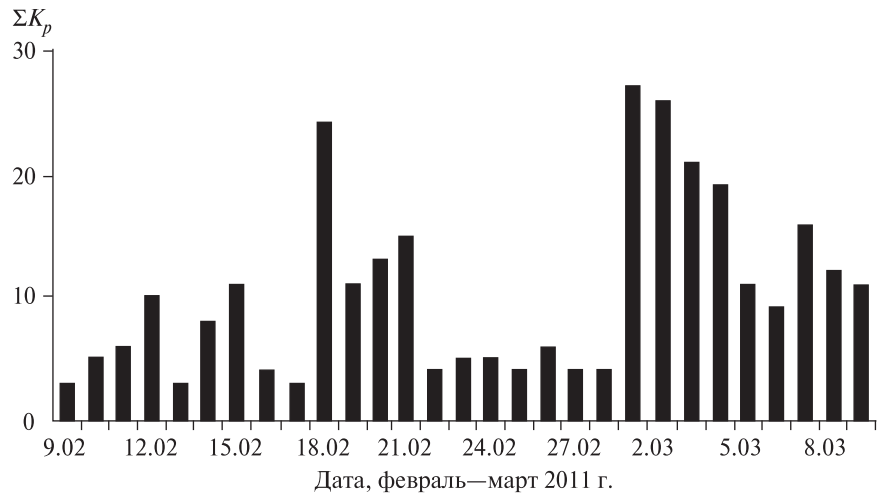


Рис. 5. Посуточные суммы K_p -индексов

Увеличение VTEC более чем в два раза превышало уровень нормальной вариабельности «день-от-дня» для спокойного периода времени.

Для тех же исходных данных было проведено исследование в рамках предложенной методики. Использовались данные станции ANKR системы IGS (www.igsb.jpl.nasa.gov). Другие станции в окрестностях Ω_u не использовались, поскольку по ним не было достоверных данных о значениях межчастотной задержки. Схема эксперимента показана на рис. 3. Область Ω_u ограничена окружностью радиуса 400 км, $H_u = 400$ км, $T_u = 90$ мин.

На рис. 4 показаны вариации δI_v величины $\Delta \bar{I}_v$ относительно средних значений $\Delta \bar{I}_v$ (для соответствующего времени суток), которые получены усреднением за семидневный интервал:

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

Анализ результатов показал, что 7 января наблюдается аномальное (более чем в два раза относительно средних значений) увеличение δI_v и электронной концентрации ионосферы над эпицентром. Результаты полностью соответствуют выводам, полученным в работе [4].

Анализ ионосферных аномалий в подготовительный период разрушительного землетрясения в Японии ($M = 9.0$) в марте 2011 г. Геомагнитная обстановка в подготовительный период землетрясения была относительно спокойной. В месячном периоде перед землетрясением были зафиксированы слабые магнитные бури 18 фев-

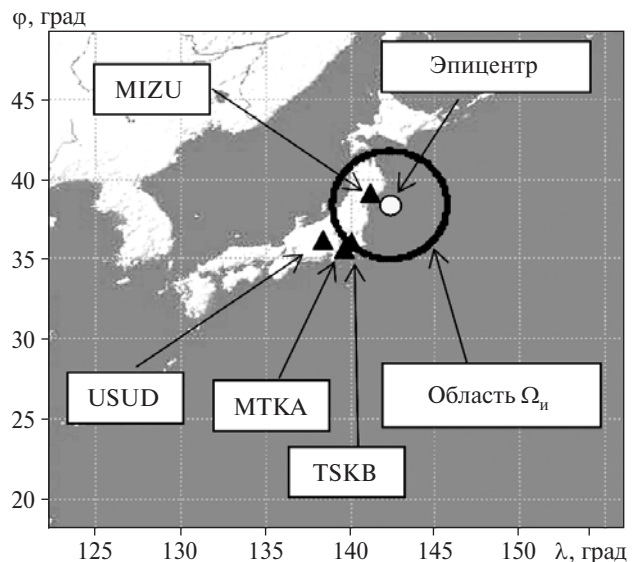


Рис. 6. Схема исследования ионосферы над эпицентром землетрясения в Японии в 2011 г.

раля и 1 марта. На рис. 5 показаны посуточные суммы K_p -индексов в рассматриваемом периоде, полученные по данным лаборатории рентгеновской астрономии Солнца Физического института Российской академии наук (www.tesis.lebedev.ru).

В целом спокойная геомагнитная обстановка дала возможность для исследования ионосферных аномалий, ассоциированных с землетрясением.

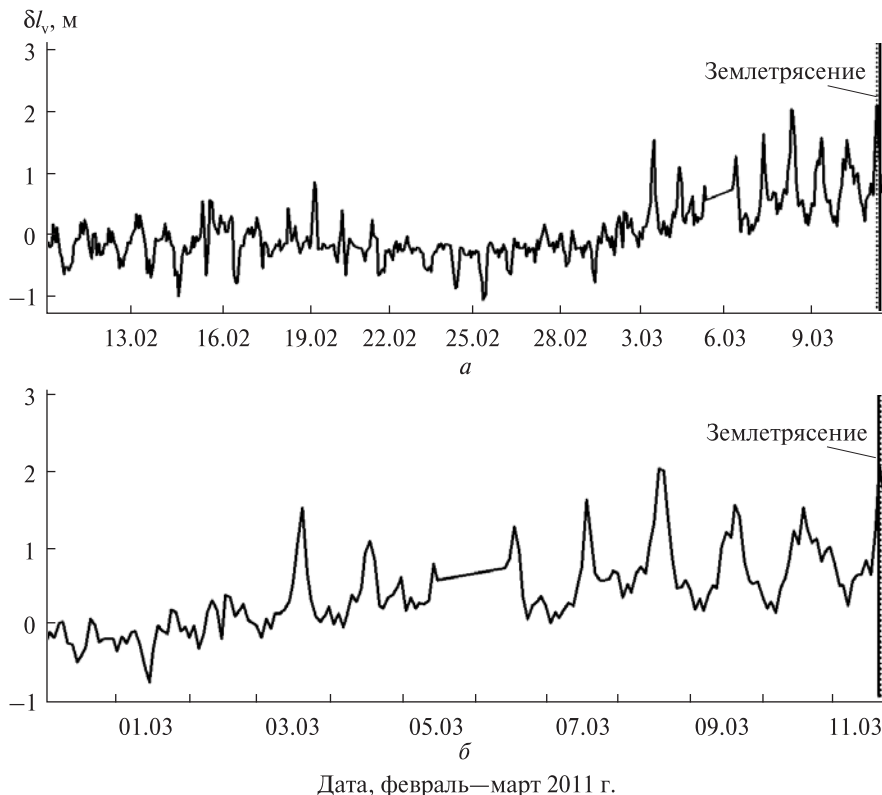


Рис. 7. Ионосферные вариации перед землетрясением на месячном интервале (а), непосредственно перед событием (б)

В исследовании использованы данные станций системы IGS, расположенные в Японии — MIZU, USUD, MTKA и TSKB. Взаимное расположение станций приема сигналов СРНС и исследуемой области ионосферы показано на рис. 6. Данные по межканальным задержкам аппаратуры спутников СРНС и приемников взяты из файлов ионосферных карт IONEX (<ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE>). Область Ω_u ограничена окружностью радиуса 400 км, $H_u = 400$ км, $T_u = 90$ мин.

Вариации δI_v в подготовительный период землетрясения показаны на рис. 7.

До 3 марта значения δI_v не выходили за пределы ± 1 м. С 3 по 10 марта отмечено устойчивое увеличение этих значений в дневное время. За трое суток до события отмечен максимум, превышающий в два раза уровень вариабельности в спокойный период. Учитывая невозмущенную геомагнитную обстановку в рассматриваемый период, отмеченные аномалии ионосферы могут быть ассоциированы с подготовкой землетрясения.

ВЫВОДЫ

Таким образом, предложена методика оценки текущего состояния локальной пространственно-временной области ионосферы по данным сети станций приема сигналов СРНС. Проведен анализ ионосферных вариаций в подготовительный период сильного землетрясения ($M = 6.8$) в Греции и показано полное соответствие полученных результатов с выводами известных исследований. Проведен анализ состояния ионосферы перед разрушительным землетрясением в Японии ($M = 9$). Показано наличие ионосферных аномалий над эпицентром за несколько дней до события, которые могут быть ассоциированы с землетрясением. Обнаружение подобных аномалий может рассматриваться как один из предвестников разрушительных землетрясений.

1. Бондур В. Г., Смирнов В. М. Ионосферные возмущения в период подготовки сейсмических событий по данным спутниковых навигационных систем // Совре-

- менные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Сб. науч. ст. — М.: ИКИ РАН, 2006. — Т. II, вып. 3. — С. 190—197.
2. Деденок В. П., Ткаченко А. А., Кочура В. О., Дейнеко В. М. Адаптивный способ компенсации ионосферной задержки спутниковых радионавигационных сигналов в локальной пространственно-временной области на основе модели Клобушара // Системи управління, навігації та зв'язку. — К.: ДП «Центральний науководослідний інститут навігації і управління», 2009. — Вип. 2 (10). — С. 22—27.
 3. Деденок В. П., Флерко С. Н., Резников Ю. В. Комплекс оперативного трехмерного мониторинга ионосферы с использованием сигналов GNSS // Матер. первого украинско-китайского форума «Наука — производство». — Х.: ХНУРЭ, 2007. — С. 132.
 4. Захаренкова И. Е., Шагмуратов И. И., Кранковски А., Лаговский А. Ф. Ионосферные аномалии, наблюдаемые в GPS TEC измерениях перед землетрясением в Греции 8 января 2006 г. ($M=6.8$) // Исследовано в России. — 2006. — 39. — С. 1047—1055.
 5. Резников Ю. В. Рекомендации по созданию системы трехмерного мониторинга ионосферы на основе сигналов спутниковых радиотехнических систем навигации // Системи управління, навігації та зв'язку. — 2010. — № 2 (14). — С. 33—36.
 6. Baran L. W., Shagimuratov I. I., Tepenitsina N. J. The use of GPS for ionospheric studies // Artif. Satell. — 1997. — 32 (1). — P. 49—60.
 7. 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.
 8. Saroso S., Liu J. Y., Hattori K., Chen C. H. Ionospheric GPS TEC anomalies and $M > 5.9$ earthquakes in Indonesia during 1993—2002 // Terr. Atmos. Ocean. Sci. — 2008. — 19. — P. 481—488. — (doi: 10.3319/TAO.2008.19.5.481(T)).

Надійшла до редакції 11.07.11

V. P. Dedenok, A. O. Tkachenko, V. M. Deyneko,
Yu. V. Reznikov

MONITORING OF DISTURBANCES IN A LOCAL SPATIO-TEMPORAL REGION OF THE IONOSPHERE FROM DATA OF A NETWORK OF RECEIVING STATIONS FOR SATELLITE RADIO NAVIGATION SIGNALS

We propose a method for the use of an estimate of an ionospheric delay of radio navigation signals for the monitoring of the ionosphere state in a local spatio-temporal area on the basis of data from several satellite radio navigation signal receiving stations. A comparative analysis is performed for ionospheric variations over the epicenter of the strong earthquake in Greece in 2006 ($M = 6.8$) and results of known studies. Some results of an analysis of the ionosphere state over the epicenter of the great earthquake in Japan in March 2011 ($M = 9.0$) are presented.