

УДК 550.388.2

## ИОНОСФЕРНОЕ ВОЗМУЩЕНИЕ, ВЫЗВАННОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕМ 26 ДЕКАБРЯ 2004 г. ВБЛИЗИ О. СУМАТРА (ПО ДАННЫМ ГЛОБАЛЬНОЙ СЕТИ GPS)

Э.И. Астафьева, Э.Л. Афраимович

### IONOSPHERIC DISTURBANCES CAUSED BY THE M9.3 SUMATRA EARTHQUAKE ON DECEMBER, 26 2004 (AS DEDUCED FROM GPS NETWORK IN THE INDIAN OCEAN)

E.I. Astafieva, E.L. Afraimovich

Анализ данных двухчастотных приемников сети GPS показал, что реакция ионосферы на землетрясение 26 декабря 2004 г. проявилась в виде «мгновенного» и «запаздывающего» откликов. «Мгновенный» отклик является отражением ударно-акустической волны, которая была зарегистрирована через 14 мин после основного толчка. «Запаздывающий» отклик, который представляет собой квазипериодические вариации полного электронного содержания с периодом порядка 15 мин, был зарегистрирован на расстоянии от 1000 до 5000 км от эпицентра землетрясения спустя 2–6 ч после основного толчка.

Data analysis of GPS receivers network shows that ionosphere response on the earthquake on December, 26 2004 can be classified as “momentary” and “delayed” responses. “Momentary” response is shock-acoustic wave manifestation, it was detected 14 min after the main shock. “Delayed” response represents as quasi-periodical total electron content variations with time period of about of 15 min, it was found 2-6 hours after the main shock at distances from 1000 to 5000 km out of the epicenter.

#### Введение

Исследованию отклика ионосферы на возмущения, возникающие при импульсном воздействии на атмосферу, к которым относятся, прежде всего, подземные ядерные взрывы и сильные землетрясения, посвящено множество работ [1, 2]. При таких воздействиях перемещение земной поверхности приводит к генерации акустических возмущений, которые распространяются в атмосфере до больших высот и приводят в движение плазму ионосферы вследствие столкновительного взаимодействия нейтральных и заряженных частиц.

Ионосферный отклик на землетрясения или взрывы проявляется в виде возмущений различной природы [3]. Сначала регистрируется «первая», ударно-акустическая волна (УАВ) характерной N-образной формы, распространяющаяся на расстояние до 1000 км со скоростью порядка 1000 м/с. Параметры таких УАВ достаточно хорошо исследованы с применением различных методов детектирования ионосферных возмущений (доплеровский метод в КВ-радиодиапазоне [3, 4], GPS-радиозондирование [2, 5]).

В ряде экспериментов, помимо отклика на УАВ, были обнаружены меньшие по амплитуде квазисинусоидальные волны (перемещающиеся ионосферные возмущения, ПИВ) с существенно большим периодом 10–30 мин, распространяющиеся на расстояния более 1000 км со скоростью порядка 300 м/с [3]. Считается, что этот тип волн является откликом на прохождение атмосферных акустико-гравитационных волн (АГВ). Однако до сих пор не исследованы характеристики АГВ-отклика на землетрясения на больших расстояниях от эпицентра, что обусловлено трудностями обнаружения такого отклика, поскольку источниками ПИВ могут быть разнообразными явления естественного и техногенного происхождения.

Целью настоящей работы является исследование характеристик ионосферного отклика на землетря-

сение магнитудой 9.0, которое произошло 26 декабря 2004 г. вблизи о. Суматра.

Исходными данными являются временные ряды высокочастотных вариаций полного электронного содержания (ПЭС)  $dI(t)$ ; значения ПЭС восстанавливаются по фазовым задержкам, которые приобретают двухчастотные навигационные сигналы GPS при их распространении вдоль луча приемник GPS–ИСЗ. Соответствующая методика восстановления вариаций ПЭС подробно описана [5] и в настоящей работе не рассматривается.

#### Общие сведения об эксперименте

26 декабря 2004 г. в 00:58:53 UT вблизи о. Суматра произошло землетрясение магнитудой 9.0; эпицентр (географические координаты: 3.29° N; 95.78° E) находился в Индийском океане, юго-восточнее о. Суматра (<http://www.nerc.cr.usgs.gov/neis/>). Схема GPS-измерений ПЭС 26 декабря 2004 г. представлена на рис. 1. Звездочкой показан эпицентр землетрясения, жирными точками обозначено положение станций GPS, названия станций подписаны рядом.

Уровень геомагнитной возмущенности 26 декабря оказался умеренным – в течение суток индекс  $D_{st}$  менялся от –27 до –13 нТл, индекс  $K_p$  – от 2 до 3. Анализ данных ближайших к эпицентру землетрясения магнитовариационных станций (отмечены ромбиками на рис. 1) показал, что размах флуктуаций колебаний  $H$ -компоненты магнитного поля 26 декабря 2004 г. не превысил 7 нТл.

Спустя 14–18 мин после основного толчка на близлежащих станциях GPS зарегистрирован отклик ПЭС на прохождение УАВ (рис. 2). Длительность колебания 260–300 с, амплитуда порядка 0.3–0.4 TECU (где  $TECU = 10^{16} \text{ м}^{-2}$  – общепринятая единица измерения ПЭС), что на порядок превышает амплитуду фоновых флуктуаций ПЭС в магнитоспокойный период. Изменения ПЭС отчетливо видны не только в исходных

рядах (панель *а*), но и в отфильтрованных (*б*, *в*). Параметры УАВ согласуются с результатами, полученными ранее при анализе ионосферных эффектов землетрясений [2, 5].

Наиболее интересным и важным результатом нашей работы является то, что отклик на землетрясение был зарегистрирован не только на ближайших к эпицентру, но и на существенно удаленных от него станциях спустя 2–7 ч после землетрясения. На рис. 2 представлены вариации ПЭС по мере увеличения расстояния  $L$  от эпицентра землетрясения, начиная от 500 км (станция SAMP, панель *а*), и до 5600 км (станция KGNI, панель *ж*). Очевидно, что время максимального значения амплитуды осцилляций ПЭС  $t_{\max}$  увеличивается по мере «удаления» от эпицентра. Поскольку мы наблюдаем отклики на станциях как северо-восточнее эпицентра, так и северо-западнее его, по-видимому, мы имеем дело со среднemasштабным ионосферным возмущением, распространяющимся от источника к периферии (рис. 1). Анализ зависимости запаздывания  $t_{\max}$  максимального значения амплитуды огибающей осцилляций ПЭС от расстояния  $L$  позволяет определить среднюю групповую скорость распространения возмущения; на расстоянии от 2000 км до 5000 км от эпицентра до станций GPS она оказалась близкой к 250 м/с.

Отметим, что осцилляций подобной формы после 12:00 UT зарегистрировано не было.

### Обсуждение результатов

При средней скорости распространения  $V \sim 250$  м/с и периоде колебаний  $\sim 1000$  с в нашей работе СМ ПИВ наблюдались на расстояниях до 15 длин волн, в то время как для точечного источника возмущения в обычных условиях радиус пространственной когерентности ПИВ не превышает 3–5 длин волн.

Возможное объяснение этому явлению может быть основано на предположении о протяженности источника возмущения, определяемой площадью земной (водной) поверхности, смещенной при землетрясении за короткий промежуток времени. Другой возможный источник возмущения – распространяющаяся от эпицентра сейсмическая воздушная волна,

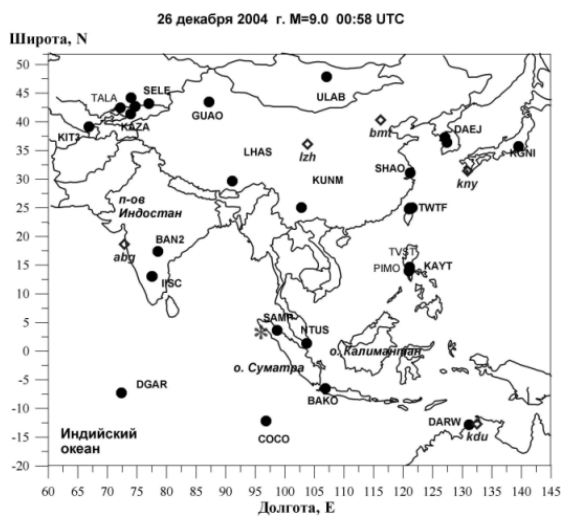


Рис. 1. Геометрия эксперимента во время землетрясения 26 декабря 2004 г.

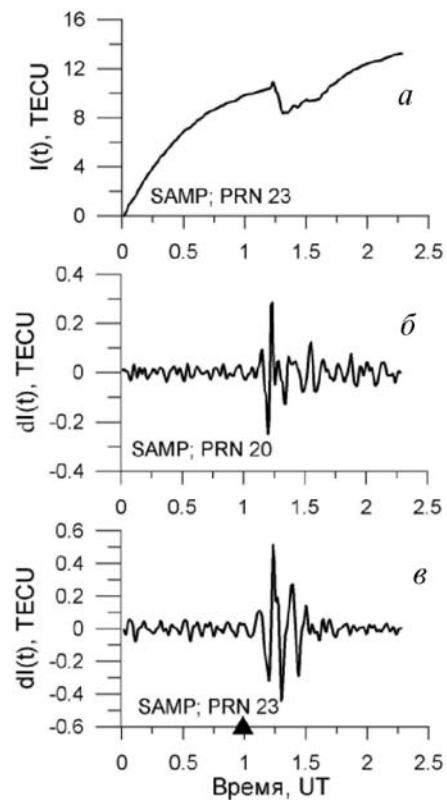


Рис. 2. Исходные (*а*) и отфильтрованные (*б*, *в*) ряды ПЭС на станции SAMP, номера ИСЗ PRN 20 и PRN23.

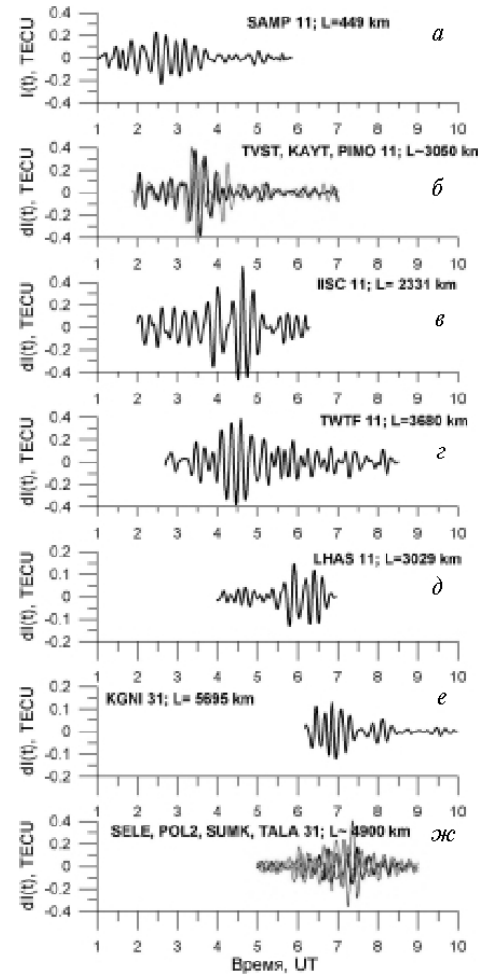


Рис. 3. Осцилляции ПЭС, зарегистрированные на станциях GPS на различных расстояниях от эпицентра.

возникающая при вертикальных смещениях земной породы при землетрясении. Вычисленные нами направление и скорость распространения ПИВ соответствуют параметрам ионосферных возмущений, возникших при распространении воздушных волн, которые были зарегистрированы после мощного землетрясения на Аляске 28 марта 1964 г. [6].

Авторы благодарны Пономареву Е.А. и Кузнецову В.В. за интерес к работе и полезную дискуссию и С.В. Воейкову за помощь при первичной обработке данных. Эта работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 03-05-64100), интеграционного гранта СО РАН – ДВО РАН N 181, а также гранта N НШ-272.2003.5 государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации.

#### *СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ*

1. Голицын Г.С., Кляцкин В.И. Колебания в атмосфере, вызываемые движениями земной по-

верхности // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1967. Т. 111, № 10. С. 1044–1052.

2. Calais E., Minster J.B. GPS detection of ionospheric perturbations following the January 1994, Northridge earthquake // Geophys. Res. Lett. 1995. V. 22. P. 1045–1048.

3. Нагорский П.М., Тарашук Ю.Е. Ионосферные возмущения, вызываемые мощными взрывами // Изв. вузов. Радиофизика. 1992. Т. 35, № 9. С. 110–119.

4. Намазов С.А., Новиков В.Д., Хмельницкий И.А. Доплеровские смещения частоты при ионосферном распространении дециметровых радиоволн (обзор) // там же. Радиофизика. 1975. Т. 18, № 4. С. 486–499.

5. Афраимович Э.Л., Косоголов Е.А., Плотников А.В., Уралов А.М. Параметры ударно-акустических волн, генерируемых при землетрясениях // Физика Земли. 2001. № 6. С. 16–28.

6. Bolt B. Seismic air waves from the great 1964 earthquake // Nature. 1964. V. 202, № 4937. P. 63–64.

*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск*