

# ОТКЛИК ИОНОСФЕРЫ НА ТУВИНСКИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 27 ДЕКАБРЯ 2011 г. И 26 ФЕВРАЛЯ 2012 г.

<sup>1</sup>Н.П. Перевалова, <sup>2</sup>А.С. Жупитяева, <sup>1</sup>С.В. Воейков,  
<sup>1,3</sup>Э.И. Астафьева, <sup>4</sup>В.А. Саньков

## IONOSPHERIC RESPONSE TO TUVA EARTHQUAKES OF DECEMBER 27, 2011 AND FEBRUARY 26, 2012

<sup>1</sup>N.P. Perevalova, <sup>2</sup>A.S. Zhupityaeva, <sup>1</sup>S.V. Voeikov,  
<sup>1,3</sup>E.I. Astafyeva, <sup>4</sup>V.A. Sankov

По данным GPS проведено исследование отклика ионосферы на два землетрясения, произошедших в республике Тува 27 декабря 2011 г. ( $M_w=6.7$ ) и 26 февраля 2012 г. ( $M_w=6.6$ ). Отклики на оба землетрясения выражены слабо. На отдельных лучах «приемник–спутник» на расстояниях 500–800 км от эпицентра зарегистрированы возмущения полного электронного содержания с периодом ~10 мин. Горизонтальная скорость перемещения возмущений составляла около 200 м/с, что близко к скорости звука в нижней атмосфере.

Ionospheric responses to the earthquakes in Tuva Republic of December 27, 2011 ( $M_w=6.7$ ) and February 26, 2012 ( $M_w=6.6$ ) were investigated using GPS sounding data. The responses to both earthquakes are poorly defined. At particular receiver–satellite beams the total electron content disturbances with ~10 min period are registered at 500–800 km from epicenters. The horizontal velocity of traveling disturbance is about 200 m/s that is close to the sound velocity in the lower atmosphere.

### Введение

В зимний период 2011–2012 гг. на территории республики Тува произошло два достаточно сильных землетрясения. Землетрясение с магнитудой  $M_w=6.7$  зарегистрировано 27 декабря 2011 г. в 15:22 UT (23:22 LT). Эпицентр ( $51.84^\circ$  N,  $96.01^\circ$  E) находился в 94 км к востоку от Кызыла на глубине около 15 км [www.globalcmt.org]. 26 февраля 2012 г. в 06:17 UT (14:17 LT) в том же районе произошло землетрясение с магнитудой  $M_w=6.6$ , эпицентр ( $51.76^\circ$  N,  $96.06^\circ$  E) которого располагался на глубине ~19 км [www.globalcmt.org]. Данное землетрясение отличалось большой продолжительностью, подземные толчки ощущались на расстоянии свыше тысячи километров от эпицентра. Как известно, колебания земной поверхности при землетрясениях могут вызывать волновые возмущения в атмосфере, способные проникать до ионосферных высот (100–400 км) и проявляться там в виде перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ). ПИВ, вызванные крупными землетрясениями ( $M_w \geq 7$ ) в различных регионах, регистрировались неоднократно [Davies, Baker, 1965; Afraimovich et al., 2001; Artru et al., 2004; Афраймович, Перевалова, 2006; Astafyeva et al., 2009; Tsugawa et al., 2011]. Однако сообщений о детектировании волновых ионосферных возмущений, обусловленных землетрясениями с  $M_w < 7$ , значительно меньше. Это может свидетельствовать о том, что отклик ионосферы на такие толчки относительно слаб и присутствует не всегда. В настоящей работе представлены результаты исследований поведения ионосферной плазмы над зонами двух Тувинских землетрясений, полученные с использованием системы GPS.

Исследования проводились по данным вариаций полного электронного содержания (ПЭС), которые рассчитывались на основе фазовых измерений двухчастотных приемников GPS, расположенных в Новосибирске (ст. NOVМ) и в урочище Бадары в обсерватории ИПА РАН (ст. BADG, [www.ipa.nw.ru]). На рис. 1 показаны траектории ионосферных точек

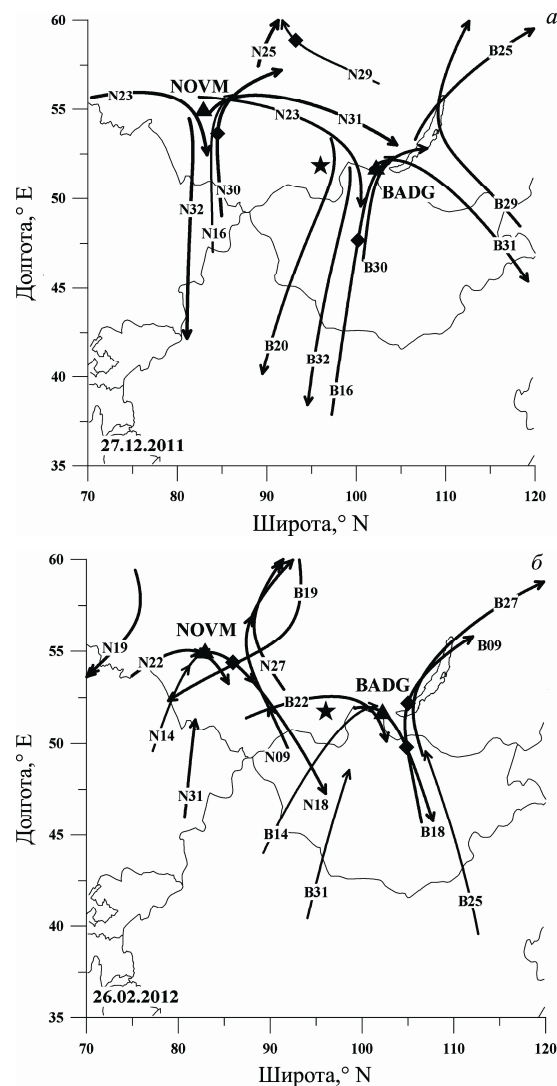


Рис. 1. Траектории ионосферных точек спутников GPS, наблюдавшихся на станциях NOVМ и BADG 27 декабря 2011 г. (а) и 26 февраля 2012 г. (б). Положение станций отмечено треугольниками, цифры у траекторий обозначают номера спутников GPS. Звездочками показаны эпицентры землетрясений.

на высоте максимума ионизации  $h_{\max}=300$  км для спутников GPS, которые наблюдались на станциях NOVМ и BADG 27.12.2011 г. в 15:00–19:00 UT (рис. 1, а) и 26.02.2012 г. в 05:00–09:00 UT (рис. 1, б). Траектории спутников, наблюдавшихся в зоне эпицентра в момент землетрясения, отмечены черным цветом. Для выделения возмущений исходные временные ряды вариаций ПЭС подвергались сглаживанию с временным окном 2 мин (для удаления высокочастотных колебаний) и удалению линейного тренда с временным окном 10 мин. Данная методика хорошо апробирована, с ее помощью неоднократно регистрировались возмущения, вызванные землетрясениями [Afraimovich et al., 2001; Афраймович, Перевалова, 2006; Astafyeva et al., 2009].

#### Анализ экспериментальных данных

На рис. 2 приведены отфильтрованные вариации ПЭС  $dl(t)$ , полученные для землетрясений 27 декабря 2011 г. (а) и 26 февраля 2012 г. (б) на станциях NOVМ, BADG в день землетрясения, а также в предыдущий и последующий дни. Отклик на оба землетрясения выражен очень слабо. Двадцать седьмого декабря 2011 г. наиболее ярко он проявился на лучах NOVМ–PRN30, NOVМ–PRN29, BADG–PRN16 (траектории N30, N29, B16 на рис. 1, а). Отклик представлял собой колебания ПЭС с периодом около 10 мин (рис. 2, а) и наблюдался на расстояниях 799 км (луч N30), 801 км (луч N29), 553 км (луч B16) от эпицентра. Максимумы амплитуды откликов отмечены ромбами на соответствующих траекториях на рис. 1, а. Средняя горизонтальная скорость перемещения возмущения, рассчитанная для трех данных лучей, составила  $198 \pm 23$  м/с.

Двадцать шестого февраля 2012 г. отклик, имевший характерную N-образную форму с периодом ~10 мин, удалось обнаружить на лучах NOVМ–PRN18, BADG–PRN18, BADG–PRN09 (траектории N18, B18, B09 на рис. 1, б). Максимумы амплитуды откликов отмечены ромбами на соответствующих траекториях на рис. 1, б. Расстояния от эпицентра, на которых зарегистрированы отклики, составили: 734 км для луча N18, 654 км для луча B18, 614 км для луча B09. Оценка средней горизонтальной скорости перемещения возмущения, выполненная для трех лучей, дала величину  $176 \pm 83$  м/с. Скорости перемещения возмущений, полученные для двух землетрясений, близки к скорости звука в нижней атмосфере. Такие возмущения могут быть обусловлены гравитационной модой атмосферных волн, вызванных землетрясением [Tsugawa et al., 2011]. На остальных лучах для обоих землетрясений амплитуда колебаний ПЭС не превышала уровня фоновых флуктуаций.

Относительно небольшая ( $M_w=6.7$ , 6.6) интенсивность Тувинских землетрясений обусловила малую амплитуду отклика ПЭС, а также трудность выделения откликов из фоновых флуктуаций. Аналогичные результаты были получены нами для землетрясения с магнитудой  $M_w=6.7$ , которое произошло в Греции 8 января 2006 г. Колебания ПЭС с периодом около 15 мин, по всей вероятности связанные с данным

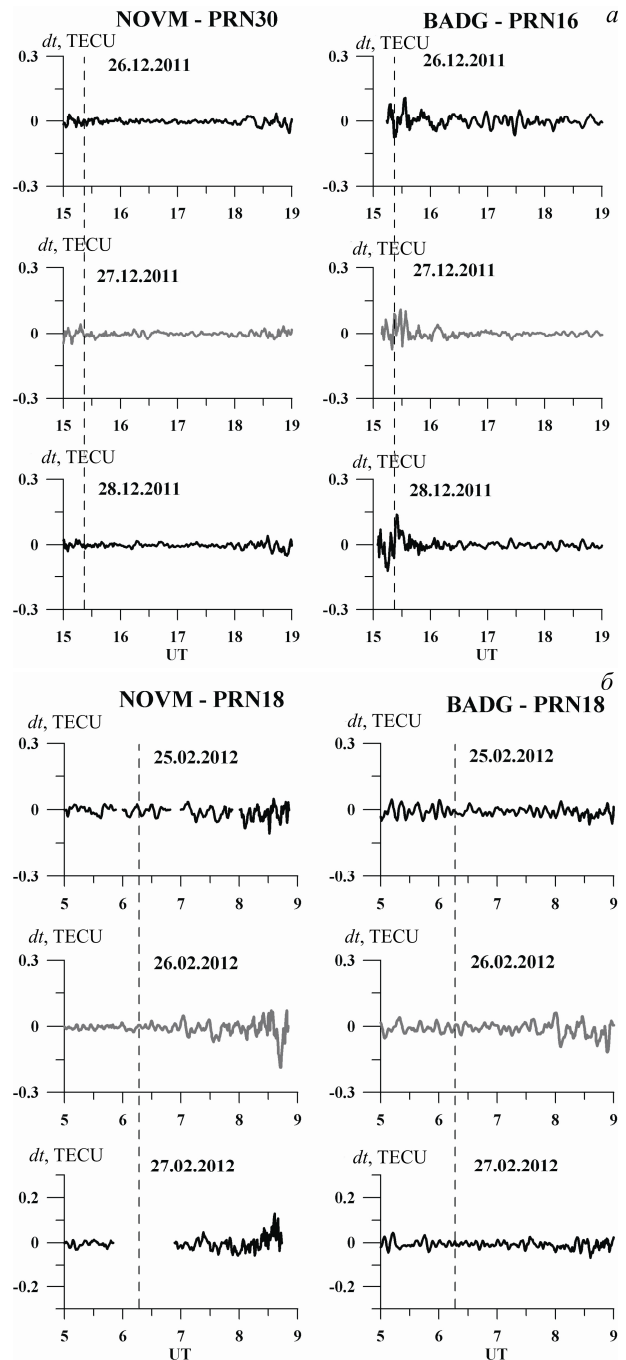


Рис. 2. Отфильтрованные вариации ПЭС, полученные для спутников GPS PRN30, PRN16, PRN18 на станциях NOVМ, BADG 26–28 декабря 2011 г. (а) и 25–27 февраля 2012 г. (б). Моменты землетрясений отмечены штриховыми линиями.

землетрясением, удалось выделить лишь на четырех лучах «приемник–спутник», проходивших в непосредственной близости от эпицентра. Более слабое ( $M_w=6.3$ ) Култукское землетрясение вообще не вызвало заметных возмущений ПЭС в ионосфере [Жеребцов и др., 2010]. В то же время волновые возмущения ПЭС, вызванные сильными землетрясениями с  $M_w \geq 7$ , регулярно регистрируются различными исследователями. Таким образом, магнитуда, которая служит мерой энергии, выделившейся в очаге землетрясения, имеет важное значение в процессах литосферно-ионосферного взаимодействия. При малых магнитудах, вероятно, сейсмической энергии

недостаточно для возбуждения акустических волн, способных проникнуть на высоты ионосферы и вызвать возмущения ПЭС, различимые на уровне фоновых флуктуаций.

### Заключение

По данным GPS-зондирования проведено исследование отклика ионосферы на два землетрясения в южной части Восточной Сибири: 27 декабря 2011 г. ( $M_w=6.7$ ) и 26 февраля 2012 г. ( $M_w=6.6$ ). Оба события являются достаточно крупными для данного региона, однако выделившейся сейсмической энергии оказалось недостаточно, чтобы оказать заметное влияние на ионосферу Земли. Возмущения ПЭС были зарегистрированы только на отдельных лучах на расстояниях 500–800 км от эпицентра. Горизонтальная скорость перемещения возмущений составляла около 200 м/с, что близко к скорости звука в нижней атмосфере.

Авторы выражают благодарность ИПА РАН за предоставление данных станции BADG. Работа выполнена при поддержке междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН № 11 и Министерства образования и науки РФ (госконтракт № 14.518.11.7065, соглашения № 8388, № 8699).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Афраимович Э.Л., Первалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: Изд-во ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАН, 2006. 480 с.

Жеребцов Г.А., Первалова Н.П., Астафьева Э.И. и др. Исследование геодинимических и ионосферных возмущений во время Култукского землетрясения 27 августа 2008 г. // Журнал радиоэлектроники. 2010. С. 205–219. [http://jre.cplire.ru/jre/library/Ulan-Ude-2010/pdf/s2\\_2.pdf](http://jre.cplire.ru/jre/library/Ulan-Ude-2010/pdf/s2_2.pdf).

Afraimovich E.L., Perevalova N.P., Plotnikov A.V., Uralov A.M. The shock-acoustic waves generated by the earthquakes // Ann. Geophys. 2001. V. 19, N 4. P. 395–409.

Artru J., Farges T., Lognonné P. Acoustic waves generated from seismic surface waves: Propagation properties determined from Doppler sounding observations and normal-mode modeling // Geophys. J. International. 2004. V. 158, N 3. P. 1067–1077.

Astafyeva E., Heki K., Afraimovich E., et al. Two-mode long-distance propagation of coseismic ionosphere disturbances // J. Geophys. Res: Space Phys. 2009. V. 114, A10307. doi:10.1029/2008JA013853.

Davies K., Baker D.M. Ionospheric effects observed around the time of the Alaskan earthquake of March 28, 1964 // J. Geophys. Res. 1965. V. 70. P. 2251–2253.

Tsugawa T., Saito A., Otsuka Y., et al. Ionospheric disturbances detected by GPS total electron content observation after the 2011 Tohoku Earthquake // Earth, Planets and Space. 2011. V. 63, N 7. P. 875–879.

[www.globalcmt.org](http://www.globalcmt.org).

[www.ipa.nw.ru](http://www.ipa.nw.ru).

<sup>1</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>2</sup>Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

<sup>3</sup>Парижский институт физики Земли, Париж, Франция

<sup>4</sup>Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия