

GPS-регистрация ионосферных эффектов землетрясений в двухчастотном и одночастотном режимах

О.А. Горбачев¹, В.Б. Иванов², А.А. Холмогоров²

¹*Иркутский филиал Московского государственного технического
университета гражданской авиации, Иркутск, 664009, Россия*

E-mail: gorbachev_oa@mail.ru

²*Иркутский государственный университет, Иркутск, 664003, Россия*

E-mail: ivb@ivb.baikal.ru, varagon007@yandex.ru

Целью работы является изучение возможностей исследования нерегулярных вариаций полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы при использовании двухчастотных и одночастотных измерений в системе GPS. Такие возможности рассматриваются на примерах регистрации временного хода наклонного ПЭС после мощных землетрясений в Японии 11 марта 2011 года и в Чили 27 февраля 2010 года. Исходными данными являются двухчастотные и одночастотные фазовые и кодовые измерения на станциях международной сети IGS. В результате сравнения временных ходов ПЭС во время землетрясения и в контрольные дни подтверждена реакция ионосферы в виде квазипериодических возмущений регулярного временного хода. Наряду с данным откликом ионосферы наблюдаются реакции ионосферы качественно иного характера – излома на временном ходе ПЭС. Данный тип реакции ионосферы зафиксирован во время обоих исследованных землетрясений. Из полученных данных по фиксации моментов изломов была произведена оценка скорости распространения возмущений, формирующих первичный отклик ионосферы на землетрясение. При сравнении одночастотных и двухчастотных режимов измерений показано их качественное и количественное совпадение, позволяющее производить указанные оценки и в одночастотном режиме.

Ключевые слова: GPS, ионосфера, одночастотные измерения, землетрясение, ПЭС

Одобрена к печати: 30.07.2016

DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-5-251-261

Введение

Новое направление диагностики состояния верхней ионосферы Земли на основе обработки сигналов спутниковых радионавигационных систем было развито под руководством профессора Э.Л. Афраймовича (Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск). Теоретические основы и разнообразные примеры такой диагностики представлены, в частности, в монографии (Афраймович, Перевалова, 2006) и диссертации (Перевалова, 2014). В этой монографии, а также в ряде статей коллег и учеников профессора Афраймовича посредством GPS-мониторинга выполнены исследования эффектов в земной ионосфере, связанных с солнечными затмениями, землетрясениями, геомагнитными возмущениями, мощными тропическими циклонами. Все эти результаты были получены на основе исследования относительных временных вариаций полного электронного содержания ионосферы по данным об изменениях фазовых путей спутниковых радиосигналов, регистрируемых двухчастотной приемной аппаратурой. Возможности использования данных одночастотных измерений для целей диагностики ионосферы представлены в научных публикациях весьма скромно. Можно отметить сравнительные оценки точности одночастотных и двухчастотных измерений, приведенные в работе (Afraimovich et al., 2002). В публикации авторов (Холмогоров и др., 2015) была продемонстрирована возможность одночастотной диагностики на примере регистрации ионосферного эффекта полного солнечного затмения. В представляемой работе выполнен анализ влияния на ПЭС мощных землетрясений.

Методика и результаты исследований

При регистрации сигналов GPS на двух частотах диапазонов L1 и L2 возможно измерение временных ходов фазы принимаемых сигналов с точностью до неизвестной аддитивной постоянной – так называемая фазовая неоднозначность (Шебшаевич и др., 1993). При этом точность измерения фазы оценивается в десятые – сотые доли радиана. Величина полного электронного содержания вдоль луча от фазового центра антенны спутника до антенны приемника определяется известной формулой:

$$I = \frac{1}{40,308} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [(L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2) + \text{const}], \quad (1)$$

где f_1 и f_2 – частоты радиоволн, $L_1 \lambda_1$ и $L_2 \lambda_2$ – фазовые пути на соответствующих частотах. Наличие неизвестной константы const в формуле (1) связано с фазовой неоднозначностью. Таким образом, имеется возможность измерять не абсолютное значение ПЭС, а лишь его изменения во времени относительно начального момента регистрации.

Исходные данные для расчетов вариаций ПЭС могут быть получены из так называемых RINEX-файлов, содержащих, в частности, значения суточных ходов псевдодальностей и фазовых путей (с точностью до упомянутой аддитивной постоянной) до каждого из отслеживаемых навигационных спутников GPS, а в последние годы и ГЛОНАСС. Для станций международной сети IGS такие файлы могут быть получены с ftp-сервера <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/data/daily/>.

Исследованиям ионосферных эффектов мощных землетрясений на основе двухчастотных измерений вариаций наклонного ПЭС посвящен целый ряд статей. Анализ различных аспектов рассматриваемых далее событий в Чили 2010 года и в Японии 2011 года проведен, в том числе, в работах (Astafyeva, Lognonne, Rolland, 2011; Ясюкевич и др., 2015; Kakinami et al., 2012; Tsugawa et al., 2011). Здесь констатируются факты обнаружения реакции ПЭС на землетрясение, представляются количественные характеристики движений перемещающихся ионосферных возмущений квазиволнового характера, а также изломов на временном ходе ПЭС, даются некоторые физические интерпретации природы таких возмущений.

В частности, в публикации (Перевалова и др., 2012) производился поиск эффектов, идентифицируемых в виде появления квазипериодических возмущений регулярного временного хода ПЭС спустя некоторое время после основного толчка. На *рис. 1* показан пример такого временного хода наклонного ПЭС, полученный и нами. Три представленные кривые изображают изменения ПЭС относительно начального значения 11 марта и в два контрольных дня 10 и 12 марта. Показаны наклонные ПЭС, регистрируемые на станции TSKB международной сети IGS для спутника GPS PRN18. Сплошной тонкой линией изображен ход ПЭС за 10 марта, сплошной жирной линией – ход ПЭС за 12 марта, пунктирной линией – ход ПЭС за 11 марта. Вертикальной прямой отмечено время первичного толчка землетрясения. Отличие от представления аналогичного варианта в публикации (Перева-

лова и др., 2012) заключается в том, что в наших расчетах здесь и далее не производится удаление регулярного тренда. Для целей данной работы производить эту процедуру нет необходимости.

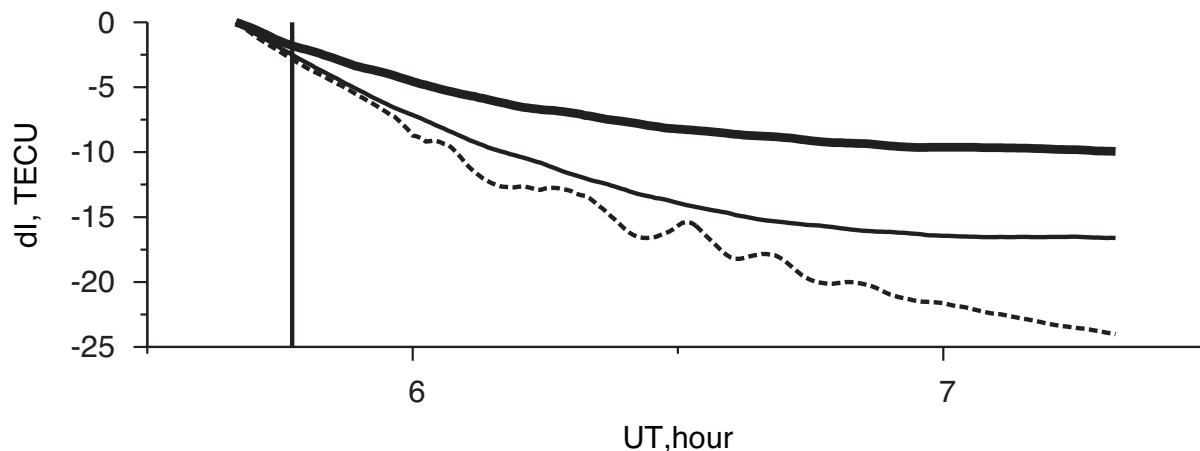
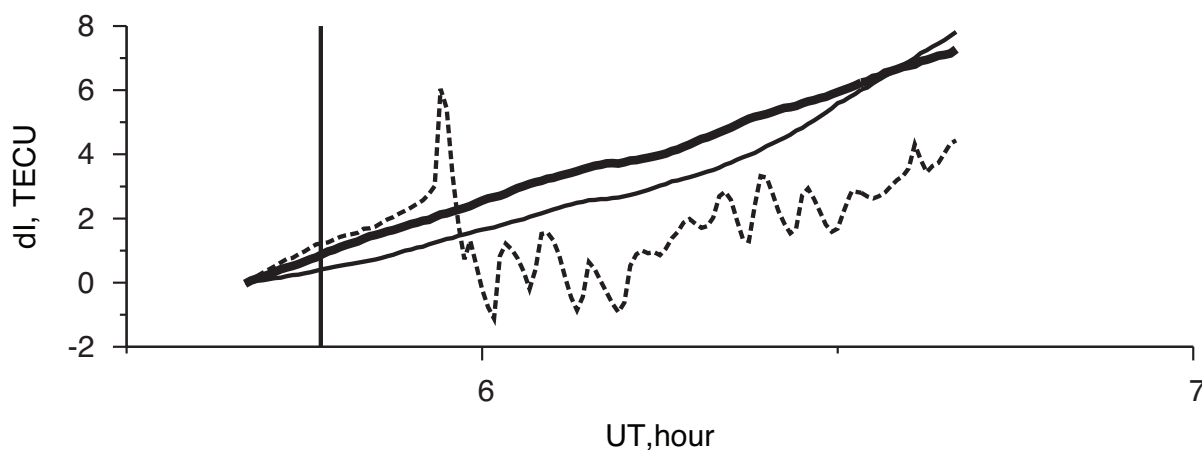


Рис. 1. Временной ход относительного изменения ПЭС на пути луча станция (TСКВ) – спутник (PRN 18). Для 10 марта – сплошная тонкая линия, 11 марта – пунктир, 12 марта – сплошная жирная линия. Вертикальной прямой изображено время землетрясения

Важнейшим обстоятельством является то, что наряду с эффектами типа, показанного на рис. 1, присутствуют возмущения, качественно отличные от формирования квазипериодических пакетов. На рис. 2 показаны подобные возмущения, зарегистрированные в Японии для пар «станция – спутник»: USUD – PRN 26 (верхний график), USUD – PRN 15 (нижний график). Представлены данные для дня землетрясения 11 марта и двух контрольных дней 9 и 10 марта. Характерной особенностью временного хода ПЭС является то, что спустя некоторое время после основного толчка регистрируется резкий излом с последующими нерегулярными флуктуациями.



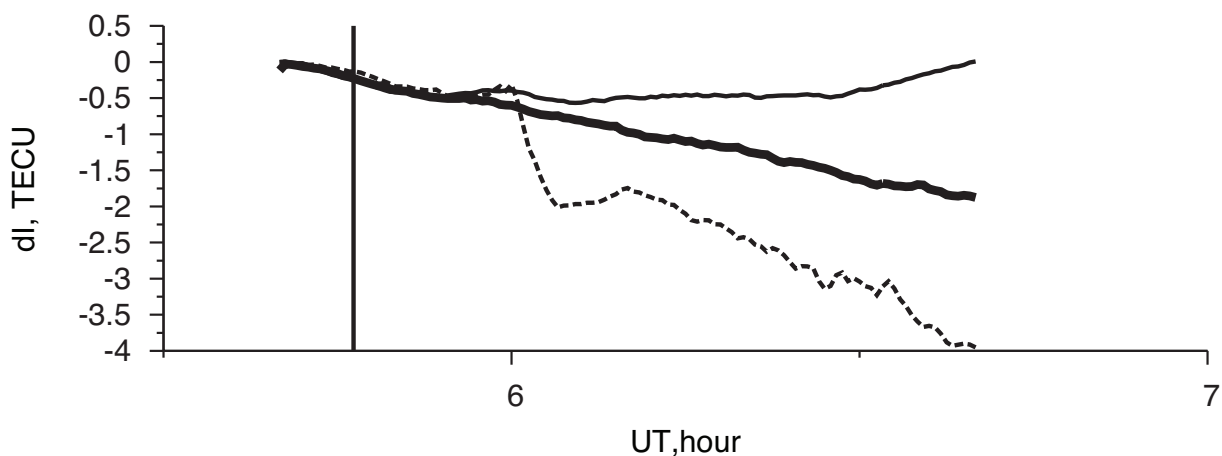
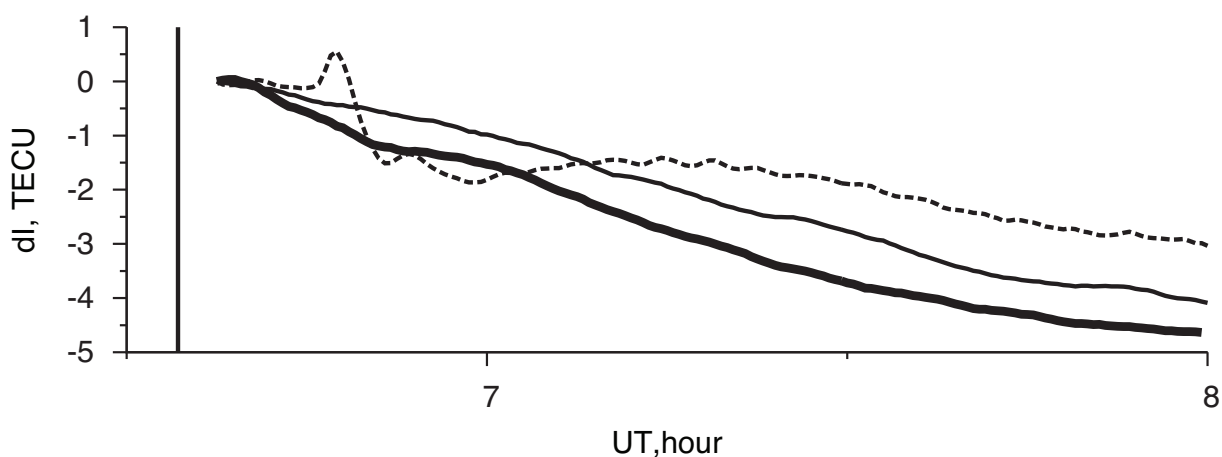


Рис. 2. Возмущения ионосферы, вызванные землетрясением в Японии 11 марта 2011 г. на пути луча станция (USUD) – спутник (PRN26 – верхний график, PRN15 – нижний график). День землетрясения 11 марта – пунктирная линия и два контрольных дня 9 марта (сплошная тонкая линия) и 10 марта (сплошная жирная линия). Вертикальной линией изображено время землетрясения

Аналогичные изломы на временном ходе ПЭС отчетливо наблюдаются и на временных вариациях, представленных в работах (Tsugawa et al., 2011; Kakinami et al., 2012; Katogawa et al., 2012), в то время как в цитируемой статье (Перевалова и др., 2012) они в значительной степени скрыты в результате удаления регулярного тренда. В публикациях (Tsugawa et al., 2011; Kakinami et al., 2012) предлагаются и физические механизмы формирования этих изломов.

Аналогичная реакция на землетрясение обнаружилась и в Чили, например, для пар «станция – спутник»: SANT – PRN 13 (верхний график), SANT – PRN 23 (нижний график) на рис. 3. Сравнение с временными ходами ПЭС в контрольные дни, показанными на последних рисунках аналогично рис. 1, убедительно свидетельствуют о том, что регистрируется именно реакция на землетрясение. Следует отметить, что подобные, хотя, возможно, и менее ярко выраженные особенности вариаций ПЭС наблюдаются и для иных комбинаций СТАНЦИЯ IGS – СПУТНИК GPS.



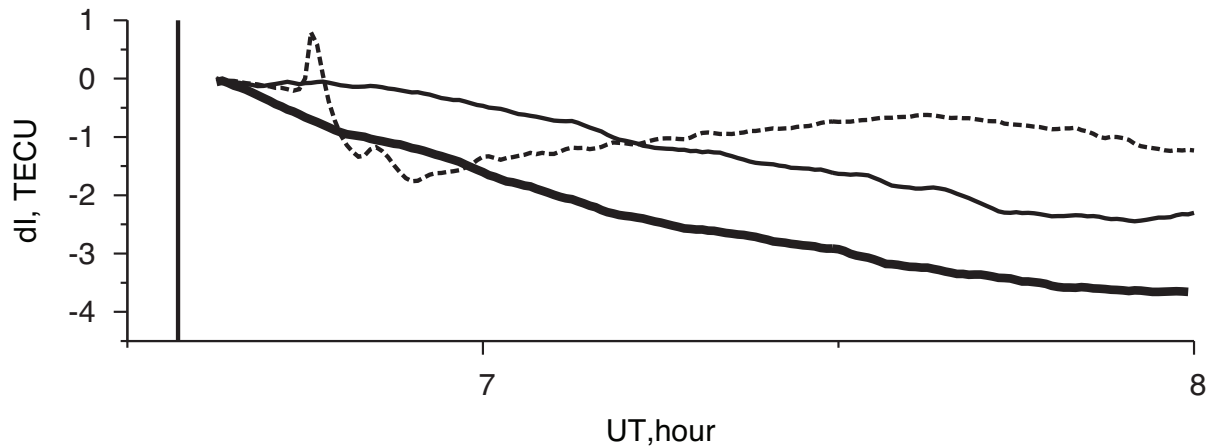


Рис. 3. Возмущения ионосферы, вызванные землетрясением в Чили 27 февраля 2010 г. на пути луча станция (SANT) – спутник (PRN13 – верхний график, PRN23 – нижний график). День землетрясения 27 марта – пунктирная линия и два контрольных дня 25 марта (сплошная тонкая линия) и 26 марта (сплошная жирная линия). Вертикальной линией изображено время землетрясения

Далее, была исследована возможность подобного детектирования с применением гораздо более простой и менее дорогостоящей одночастотной аппаратуры. Как известно, псевдодальность от приемника до передатчика спутника с номером i может быть представлена формулой:

$$P_i = R_i + T + I_i + D_i + S, \quad (2)$$

где R_i – геометрическое расстояние от приемника до спутника, T – вклад от сдвига часов приемника относительно системного времени, I_i – вклад от дополнительного запаздывания при распространении радиоволн в ионосфере, D_i – вклады от прочих факторов, включая сдвиг часов спутника, дополнительное запаздывание в тропосфере, проявление многолучевости, S – шум (аппаратные ошибки определения псевдодальности). Для фазового пути радиосигналов имеет место следующее соотношение:

$$F_i = R_i + T - I_i + D_i + const.$$

Вклад ионосферы входит в последнюю формулу с противоположным знаком относительно формулы (2). Погрешность фазовых измерений много меньше амплитудных, и по этой причине в последнем выражении слагаемое S не присутствует. Здесь снова появляется аддитивная постоянная, связанная с неоднозначностью определения фазы. В дальнейшем эта константа не учитывается, поскольку будут рассматриваться не абсолютные вариации ПЭС, а его относительные изменения от начального момента измерений. Тогда понятно, что вычитание из группового пути (псевдодальности) фазового пути дает только удвоенное значение ионосферного запаздывания и шум кодовых измерений. В окончательном виде значение ПЭС, полученное таким способом на одночастотном приемнике (для частоты $L1$), будет иметь вид:

$$I = 3,08 (C_1 - L_1 \lambda_1). \quad (3)$$

Здесь для единообразия с формулой (1) вновь использовано произведение $L_1 \lambda_1$. Под C_1 следует понимать псевдодальность, полученную для сигнала кода C/A так, что величины в скобках в соотношении (3) могут быть взяты непосредственно из RINEX-файлов. ПЭС, рассчитанное по формуле (3), представлено уже в единицах TECU. При наличии в RINEX-файлах псевдодальностей, полученных для кода повышенной точности P1 можно вместо C_1 использовать и эти данные. Хотя код P1 является закрытым, в RINEX-файлах, получаемых, в частности, со станций системы IGS, он, как правило, присутствует.

По представленной методике для события 11 марта и пары «станция – спутник», соответствующей *рис. 1*, одновременно с двухчастотными фазовыми измерениями были проведены измерения по разности псевдодальности по коду P1 и фазового пути на частоте L1 (для станции TSKB отсутствовали данные псевдодальности C/A кода). Соответствующие графики представлены на *рис. 4*. Сплошная линия – данные двухчастотных измерений, пунктирная линия – данные одночастотных измерений, вертикальная прямая – время землетрясения.

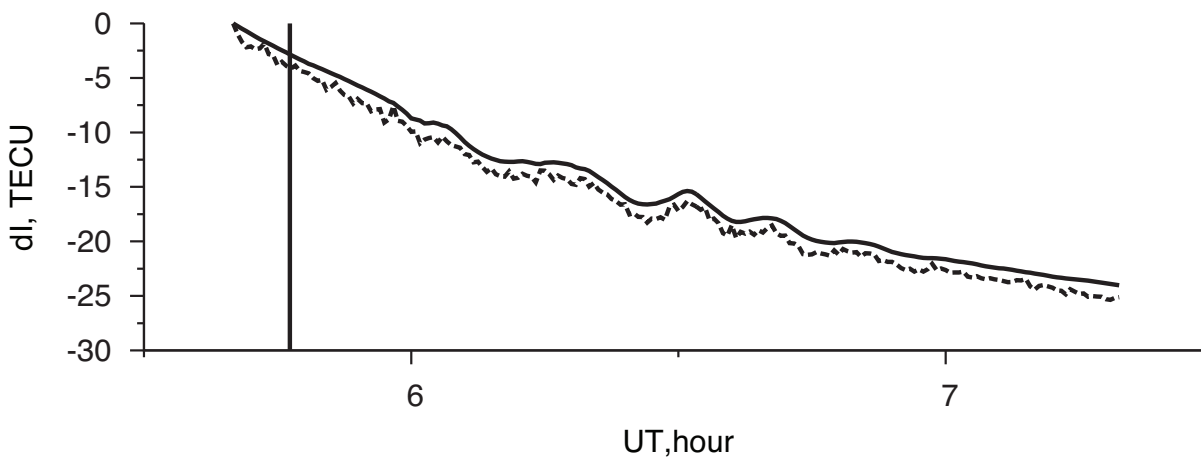


Рис. 4. Сравнение данных двухчастотных и одночастотных фазовых измерений для землетрясения в Японии 11 марта 2011 г. на пути луча станция (TSKB – спутник (PRN18)). Сплошная линия – данные двухчастотных фазовых измерений, пунктирная линия – одночастотные измерения по коду P1 и фазовому пути

Можно видеть, что одночастотные измерения воспроизводят все основные особенности временного хода, выявляемые в двухчастотном режиме. В частности, как будет показано далее, даже без дополнительной обработки можно уверенно определить время начала ионосферного отклика и характерные периоды генерируемых возмущений.

На *рис. 5* приведены графики временного хода ПЭС, определяемого в двухчастотном режиме (сплошная линия) и в одночастотном режиме с использованием C/A-кода (пунктирная линия), соответствующего графикам *рис. 2*. Несмотря на то, что кодовые измерения существенно более зашумлены, можно видеть, что и они вполне уверенно воспроизводят основные относительно долгопериодические вариации, детектируемые в двухчастотном режиме. В частности, и по кодовым измерениям можно уверенно определять момент

начальной реакции ПЭС на толчок землетрясения. Аналогичная ситуация, показанная на *рис. 6*, соответствует данным, представленным на *рис. 3*.

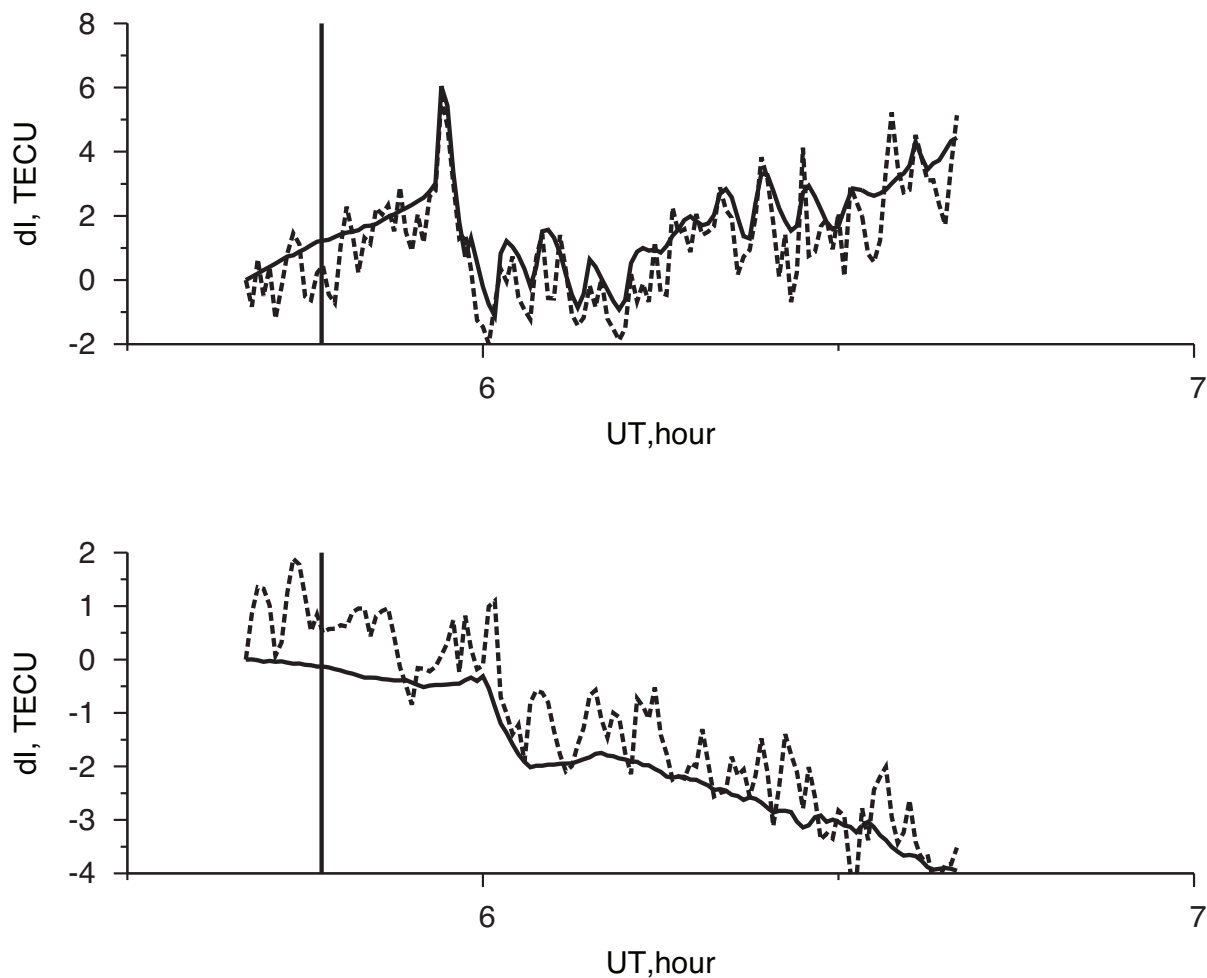


Рис. 5. Сравнение временных вариаций ПЭС, определяемых по двухчастотным фазовым измерениям (сплошная линия) и одночастотным кодовым измерениям, определяемым по C/A коду (пунктирная линия) для землетрясения в Японии 11 марта 2011 г. на пути луча станция (USUD) – спутник (PRN26 – верхний график, PRN15 – нижний график)

Фиксация времени реакции ПЭС на основной толчок позволяет сделать оценки времени и скорости распространения возмущений в атмосфере–ионосфере от очага землетрясения до ионосферной точки. На *рис. 7* показана геометрия событий в Японии (левая панель) и в Чили (правая панель), соответствующая описываемым землетрясениям. Здесь обозначены эпицентры основных толчков (звезды) и ионосферные точки (окружности), рассчитанные как области пересечения лучами от спутников до антенн станций IGS с поверхностью высоты 300 километров над Землей в момент реакции ионосферы. Необходимые для расчетов координаты спутников в требуемые моменты времени были получены с помощью программы WHERESAT из пакета GPS Toolkit (Tolman, Harris, 2004; Harris, Mach, 2007).

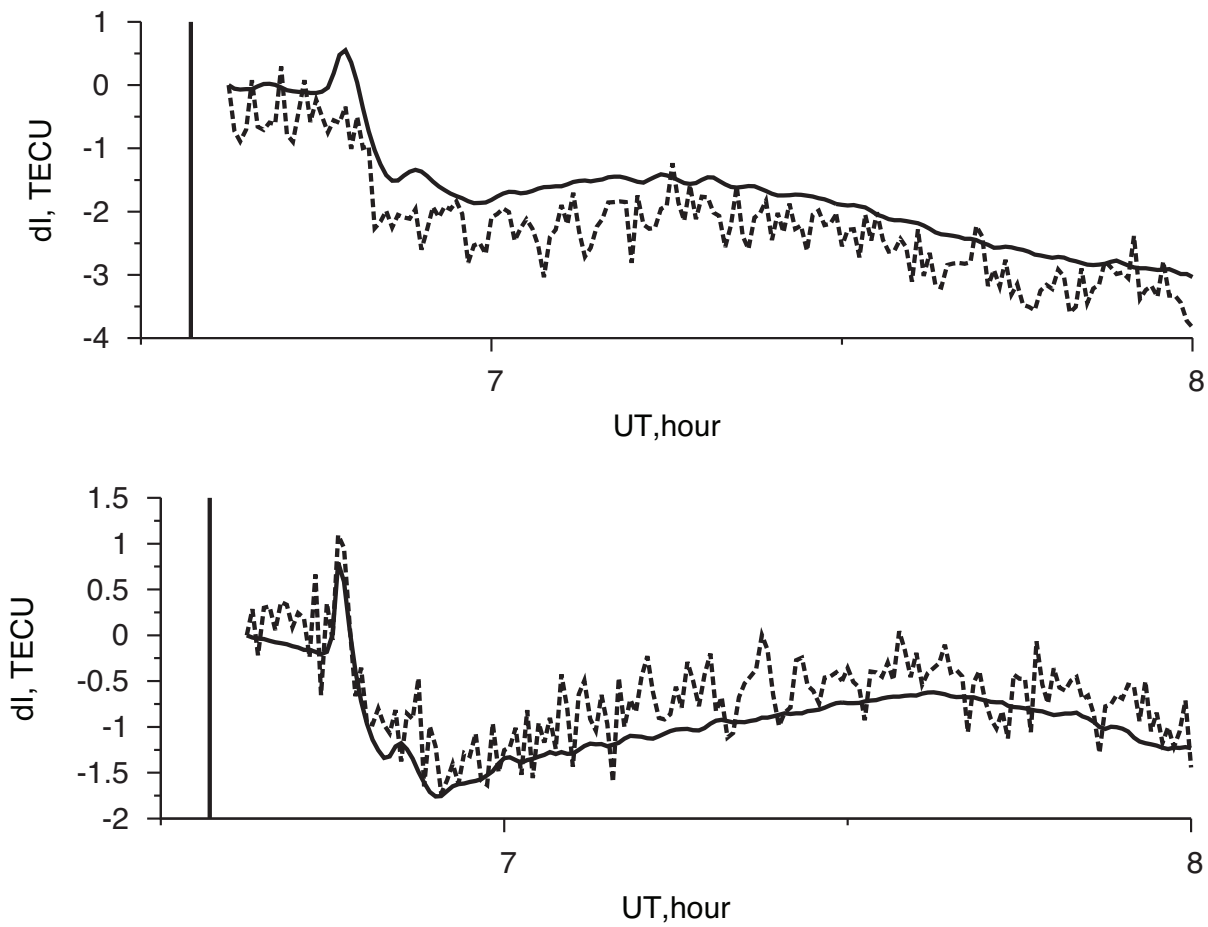


Рис. 6. Сравнение временных вариаций ПЭС, определяемых по двухчастотным фазовым измерениям (сплошная линия) и одночастотным кодовым измерениям, определяемым по C/A коду (пунктирная линия) для землетрясения в Чили 27 февраля 2010 г. на пути луча станция (SANT) – спутник (PRN13 – верхний график, PRN23 – нижний график)

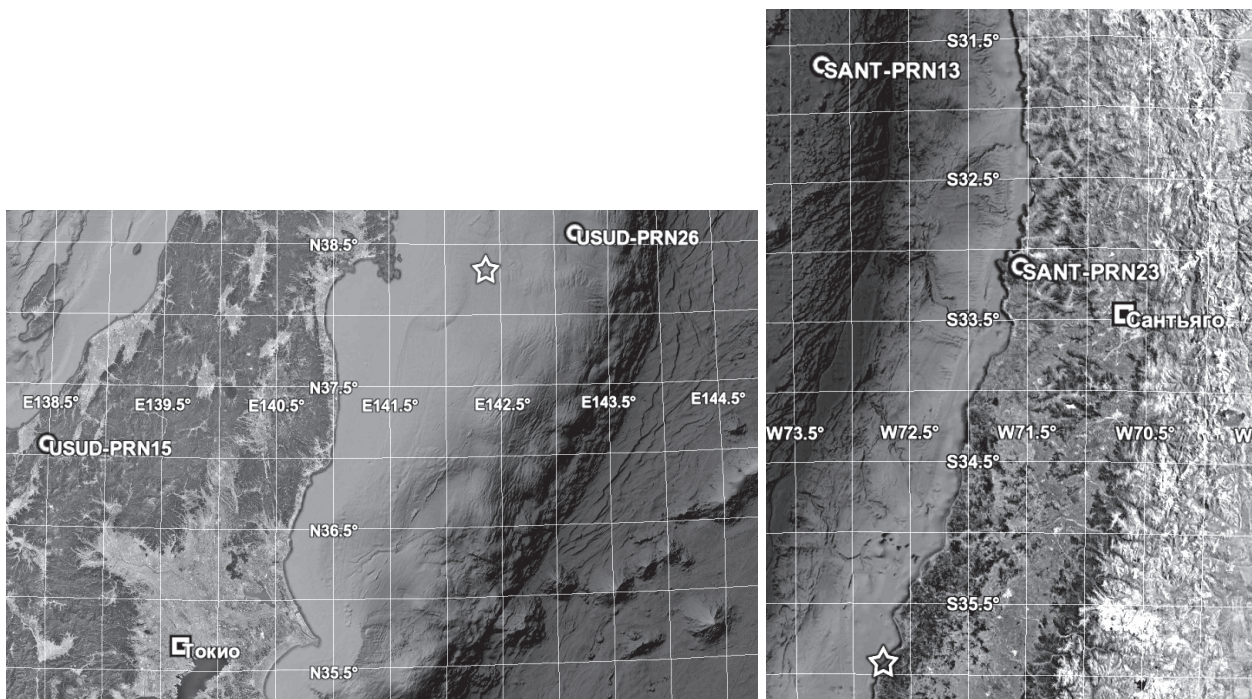


Рис. 7. Геометрия событий в Японии (левый рисунок) и в Чили (правый рисунок)

Результаты расчетов времен и скоростей распространения возмущений представлены в *табл. 1*. Время после толчка рассчитано с точностью в 30 с, что связано с дискретностью данных в формате RINEX-файлов.

Таблица 1. Результаты расчетов времен и скоростей

| <i>Землетрясение</i> | <i>Станция</i> | <i>Номер спутника</i> | <i>Время после толчка, с</i> | <i>Расстояние между ионосферными точками и эпицентром землетрясения, м</i> | <i>Скорость, м/с</i> |
|-------------------------|----------------|-----------------------|------------------------------|--|----------------------|
| Япония 11 марта 2011 | USUD | 15 | 727 | 480637,78 | 661,12 |
| | | 26 | 517 | 310113,85 | 599,83 |
| Чили 27 февраля 2010 | SANT | 13 | 643 | 568809,22 | 884,62 |
| | | 23 | 673 | 450735,23 | 669,74 |

Прежде всего, следует отметить, что реакция ионосферы, регистрируемая как излом на временном ходе ПЭС, является более быстрой по сравнению с откликом в виде формирования квазипериодических пакетов. Из таблицы можно видеть, что типичные скорости распространения детектируемых «быстрых» возмущений лежат в диапазоне около 600–900 метров в секунду. Представленные числовые оценки могут оказаться полезными для проверки тех или иных физических представлений о характере распространения возмущений.

Необходимо подчеркнуть, что приведенные оценки относятся к скорости распространения первичного возмущения в нейтральной атмосфере от поверхности Земли до ионосферных высот, в то время как в цитируемых выше статьях основное внимание акцентируется на распространении возмущений собственно в ионосферной плазме. Полученные нами временные задержки реакции ионосферы согласуются с результатами в работе (Astafyeva, Lognonne, Rolland, 2011). Следует обратить внимание на то, что в этой работе рассматривается только горизонтальная скорость распространения возмущения в самой ионосфере, полученная иными методами, а не скорость первичного возмущения.

Следует ожидать, что агентом передачи первичного возмущения в нейтральной атмосфере является ударная волна акустической природы. В этом плане можно указать на то, что по данным, представленным, в частности, в работе (Berngardt et al., 2015) скорость звука меняется от примерно 300 м/с^{-1} в приземной атмосфере до 900 м/с^{-1} на ионосферных высотах. Указанные в *табл. 1* скорости в диапазоне от 600 до 900 м/с^{-1} вполне соответствуют скоростям звука в верхней атмосфере.

Заключение

В работе представлены исследования временных вариаций полного электронного содержания ионосферы после мощных землетрясений в Японии и Чили. К анализу привлече-

ны данные фазовых и кодовых измерений сигналов спутников GPS, регистрируемых станциями сети IGS на частотах диапазонов L1 и L2. Использовались методики определения вариаций ПЭС для двухчастотного и одночастотного режимов.

Проведенное исследование показало, что мощные землетрясения уверенно детектируются одночастотной спутниковой радионавигационной аппаратурой, в том числе и в одночастотном режиме. При этом наряду с откликами ионосферы в виде квазипериодических возмущений ПЭС детектируются вариации качественно иного характера – излома на временном ходе ПЭС. Для таких реакций представлены оценки скорости распространения возмущений от источников до ионосферных точек.

Литература

1. *Афраймович Э.Л., Первалова Н.П.* GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: ГУ НЦ ВСНЦ СО РАМН, 2006. 480 с.
2. *Первалова Н.П., Воейков С.В., Ясюкевич Ю.В., Ишин А.Б., Воейкова Е.С., Саньков В.А.* Исследование ионосферных возмущений, вызванных землетрясением в Японии 11 марта 2011 г., по данным сети GEONET // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 3. С. 172–180.
3. *Холмогоров А.А., Иванов В.Б., Горбачев О.А.* Регистрация ионосферного эффекта солнечного затмения 20 марта 2015 г. по данным GPS-мониторинга в одночастотном режиме // Солнечно-земная физика. 2015. Т. 1. № 4. С. 35–39.
4. *Шебшаевич В.С., Дмитриев П.П., Иванцевич Н.В.* Сетевые спутниковые радионавигационные системы. М.: Радио и связь, 1993. 408 с.
5. *Ясюкевич Ю.В., Захаров В.И., Куницин В.Е., Воейков С.В.* Отклик ионосферы на землетрясение в Японии 11 марта 2011 г. по данным различных GPS-методик // Геомагнетизм и аэрономия. 2015. Т. 55. № 1. С. 113–122.
6. *Afraimovich L., Lesyuta O.S., Ushakov I.I., Voeykov S.V.* Geomagnetic storms and the occurrence of phase slips in the reception of GPS signals // Annals of geophysics. 2002. V. 45. No. 1. P. 55–71.
7. *Astafyeva E., Lognonne P., Rolland L.* First ionospheric images of the seismic fault slip on the example of the Tohoku-oki earthquake // Geophysical Research Letters. 2011. V. 38. L22104.
8. *Berngardt O.I., Kotovich G.V., Mikhailov S.Ya., Podlesnyi A.V.* Dynamics of vertical ionospheric inhomogeneities over Irkutsk during 06:00–06:20UT 11/03/2011 caused by Tohoku earthquake // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2015. No. 132. P. 106–115.
9. *Harris R.B., Mach R.G.* GPSTk-An Open Source GPS Toolkit // GPS Solutions. 2007. V. 11. No. 2. P. 145–150.
10. *Kakinami Y., Kamogawa M., Tanioka Y., Watanabe S., Gusman A.R., Liu J.-Y., Watanabe Y., Mogi T.* Tsunamigenic ionospheric hole // Geophysical Research Letters. 2012. V. 39. L00G27.
11. *Kamogawa M., Kakinami Y., Watanabe S., Liu J.Y., Watanabe Y.* Seismo-tsunamigenic ionospheric hole triggered by M 9.0 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake // Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences. 2012. Vol. 23. No. 3. P. 327–331.
12. *Tolman B.W., Harris R.B.* The GPS Toolkit // Linux Journal. 2004. P. 72
13. *Tsugawa T., Saito A., Otsuka Y., Nishioka M., Maruyama T., Kato H., Nagatsuma T., Murata K.T.* Ionospheric disturbances detected by GPS total electron content observation after the 2011 Tohoku Earthquake // Earth, Planets and Space. 2011. V. 63. No. 7. P. 875–879.

GPS-detection of ionospheric effects of earthquakes in dual-frequency and single-frequency modes

O.A. Gorbachev¹, V.B. Ivanov², A.A. Kholmogorov²

¹*Irkutsk Branch of Moscow State Technical University of Civil Aviation, Irkutsk 664009, Russia*

E-mail: gorbachev_oa@mail.ru

²*Irkutsk State University, Irkutsk 664003, Russia*

E-mail: ivb@ivb.baikal.ru, varagon007@yandex.ru

The aim is to study the possibilities to investigate irregular variations of the total electron content (TEC) of the ionosphere by using dual-frequency and single-frequency measurements in the GPS system. As an example, the time variation of inclined TEC was analyzed during powerful earthquakes in Japan on 11 March 2011 and in Chile on 27 February 2010. The initial data are dual-frequency and single-frequency code and phase measurements at the stations of IGS international network. As a result, the reaction of the ionosphere in the form of quasi-periodic perturbations of the regular time variation was confirmed by comparing the time variations of the TEC during the earthquake with the control days. Also, a qualitatively different response of the ionosphere in the form of inflection on the time variation of the TEC was observed. This type of reaction of the ionosphere was detected during both earthquakes investigated. From the data obtained, the speed of propagation of disturbances forming the primary response of the ionosphere to the earthquake was estimated by fixing the inflection points. Single frequency and dual frequency modes showed qualitatively and quantitatively identical results. This feature allows evaluating various options of the earthquake in single-frequency mode

Keywords: GPS, ionosphere, single-frequency measurement, earthquakes, TEC

Accepted: 30.07.2016

DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-5-251-261

References

1. Afraimovich E.L., Perevalova N.P., *GPS-monitoring verkhnei atmosfery Zemli* (GPS-monitoring of the Earth's upper atmosphere), Irkutsk, 2006, 480 p.
2. Perevalova N.P., Voeikov S.V., Yasyukevich Yu.V., Ishin A.B., Voeikova E.S., San'kov V.A., *Issledovanie ionosferykh vozmushchenii, vyzvannykh zemletryaseniem v Yaponii 11 marta 2011 g., po dannym seti GEONET* (Investigation into ionospheric disturbances caused by the earthquake of 11 March 2011 in Japan, using GEONET data), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 3, pp. 172–180.
3. Kholmogorov A.A., Ivanov V.B., Gorbachev O.A., *Registratsiya ionosfernogo effekta solnechnogo zatmeniya 20 marta 2015 g. po dannym GPS-monitoringa v odnochastotnom rezhime* (Ionospheric effect of solar eclipse of 20 marh 2015 according to the data from GPS monitoring with single frequency regime), *Solnechno-zemnaya fizika*, 2015, Vol. 1, No. 4, pp. 35–39.
4. Shebshaevich V.S., Dmitriev P.P., Ivantsevich N.V., *Setevyye sputnikovyye radionavigatsionnyye sistemy* (Network satellite radio navigation system), Moscow, 1993, 408 p.
5. Yasyukevich Yu.V., Zakharov V.I., Kunitsin V.E., Voeikov S.V., *Otklik ionosfery na zemletryasenie v Yaponii 11 marta 2011 g. po dannym razlichnykh GPS-metodik* (The response of the ionosphere to the Earthquake in Japan on March 11, 2011 as estimated by different GPS - based methods), *Geomagnetizm i aeronomiya*, 2015, Vol. 55, No. 1, pp. 113–122.
6. Afraimovich E.L., Lesyuta O.S., Ushakov I.I., Voeykov S.V., *Geomagnetic storms and the occurrence of phase slips in the reception of GPS signals*, *Annals of geophysics*, 2002, Vol. 45, No. 1, pp. 55–71.
7. Astafyeva E., Lognonne P., Rolland L., *First ionospheric images of the seismic fault slip on the example of the Tohoku-oki earthquake*, *Geophysical Research Letters*, 2011, Vol. 38, L22104.
8. Bergardt O.I., Kotovich G.V., Mikhailov S.Ya., Podlesnyi A.V., *Dynamics of vertical ionospheric inhomogeneities over Irkutsk during 06:00–06:20UT 11/03/2011 caused by Tohoku earthquake*, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2015, No. 132, pp. 106–115.
9. Harris R.B., Mach R.G., *GPSTk-An Open Source GPS Toolkit*, *GPS Solutions*, 2007, Vol. 11, No. 2, pp. 145–150.
10. Kakinami Y., Kamogawa M., Tanioka Y., Watanabe S., Gusman A.R., Liu J.-Y., Watanabe Y., Mogi T., *Tsunamigenic ionospheric hole*, *Geophysical Research Letters*, 2012, Vol. 39, L00G27.
11. Kamogawa M., Kakinami Y., Watanabe S., Liu J.Y., Watanabe Y., *Seismo-tsunamigenic ionospheric hole triggered by M 9.0 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake*, *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Science*, 2012, Vol. 23, No. 3, pp. 327–331.
12. Tolman B.W., Harris R.B., *The GPS Toolkit*, *Linux Journal*, 2004, p. 72.
13. Tsugawa T., Saito A., Otsuka Y., Nishioka M., Maruyama T., Kato H., Nagatsuma T., Murata K.T., *Ionospheric disturbances detected by GPS total electron content observation after the 2011 Tohoku Earthquake*, *Earth, Planets and Space*, 2011, Vol. 63, No. 7, pp. 875–879.