

УДК: 550.338.2

DOI: 10.26907/rwp292025.167-170

РЕГИСТРАЦИЯ ПО ДАННЫМ ГНСС ВОЗМУЩЕНИЙ В ИОНОСФЕРЕ, ИНИЦИИРОВАННЫХ ПОДЗЕМНЫМИ ЯДЕРНЫМИ ИСПЫТАНИЯМИ В СЕВЕРНОЙ КОРЕЕ

Н.П. Перевалова¹, Н.В. Шестаков^{2,3}, G. Meng⁴, W. Wu⁴

¹Институт солнечно-земной физики СО РАН, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а
E-mail: pereval@iszf.irk.ru

²Дальневосточный федеральный университет, 690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10
E-mail: shestakov.nv@dvfu.ru

³Институт прикладной математики ДВО РАН, 690922, г. Владивосток, ул. Радио, 7
E-mail: shestakov.nv@dvfu.ru

⁴Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration, 100036, Beijing, Haidian District, Fuxing Road, 63
E-mail: mgj@ief.ac.cn, wwei@ief.ac.cn

Аннотация. По данным данных сетей наземных приемников глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) GPS, ГЛОНАСС исследованы возмущения, вызванные в ионосфере четырьмя подземными ядерными испытаниями (взрывами), произведенными в Северной Корее в 2009–2017 гг. Возмущения в ионосфере наблюдались на большом количестве лучей «приемник ГНСС – спутник ГНСС». Ионосферные возмущения начинали регистрироваться через 8–13 мин после подземного ядерного испытания и наблюдались в течение более 2–5 часов (в зависимости от мощности взрыва). Как правило, первыми регистрировались перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ), распространявшиеся от эпицентра со средними скоростями 130–600 м/с. После прохождения ПИВ над эпицентром подземного ядерного испытания наблюдалась область малоподвижных возмущений ионосферной плазмы, скорость которых составляла 7–50 м/с. Наиболее ярко этот эффект проявился после самого сильного взрыва 03.09.2017. Причиной формирования данной области может быть образование стоячих волн в атмосфере, развитие плазменных неустойчивостей или проникновение в ионосферу аномального электрического поля, вызванного просочившимися на поверхность радиоактивными веществами.

Ключевые слова: подземные ядерные испытания; ионосферные возмущения; ГНСС

GNSS DETECTION OF IONOSPHERIC DISTURBANCES TRIGGERED BY UNDERGROUND NUCLEAR TESTS IN NORTH KOREA

N.P. Perevalova, N.V. Shestakov, G. Meng, W. Wu

Abstract. Based on data from networks of ground-based receivers of the Global Navigation Satellite Systems (GNSS), GPS and GLONASS we studied the disturbances caused in the ionosphere by four underground nuclear tests (explosions) which were realized in North Korea in 2009–2017. Disturbances in the ionosphere were detected on a significant number of "GNSS receiver - GNSS satellite" lines of sight. Ionospheric disturbances started to be detected 8–13 minutes after the underground nuclear test and were observed for a period of more than 2–5 hours (depending on the explosion power). As a rule, traveling ionospheric disturbances (TIDs) were first recorded; they propagated from the epicenter at average speeds of 130–600 m/s. After TID passage over the epicenter of the underground nuclear test, there was a region of non-travelling ionospheric plasma disturbances with the velocity about 7–10 m/s. This effect was especially pronounced after the most powerful explosion on 03.09.2017. The possible reasons for the formation of this region could be the creation of standing waves in the atmosphere, the development of plasma instabilities, or the penetration into the ionosphere of an abnormal electric field generated by radioactive substances leaked onto the surface.

Keywords: underground nuclear tests; ionospheric disturbances; GNSS

Введение

В 2006–2017 гг. на ядерном полигоне Punggye-ri (41.3° N, 129.0° E) в Северной Корее было произведено шесть подземных ядерных испытаний (взрывов) [1–3]. С помощью распределенной наземной сети приемников GPS/ГЛОНАСС после всех шести взрывов регистрировались перемещающиеся ионосферные возмущения [4–10]. ПИВ имели периоды 1–12 мин и распространялись радиально от места взрыва. Скорость ПИВ варьировалась от 80 до 1300 м/с. После взрывов 25.05.2009 и 03.09.2017 выявлено соответственно два [6, 7] и три [10]

типа ПИВ, распространявшихся с разными скоростями. Периоды ПИВ позволяют считать, что эти возмущения обусловлены акустическими волнами. В тоже время авторы [8, 9] обнаружили ПИВ, вызванные взрывами 03.09.2017, 25.05.2009, 12.02.2013. и 06.01.2016, не только в районе Корейского п-ова, но также в магнитосопряженной точке в Южном полушарии. Это дает основание предполагать, что зарегистрированные ПИВ обусловлены возмущением электрического поля, а электрические поля, генерируемые подземным ядерным взрывом, играют важную роль в формировании ионосферных возмущений. Наконец, в работе [10] показано, что 3 сентября 2017 г. после прохождения вызванных взрывом ПИВ над местом подземного ядерного испытания сформировалась долгоживущая область малоподвижных возмущений ионосферной плазмы, скорость которых составляла около 7 м/с. Природа и механизмы формирования данной области требуют дальнейшего исследования и моделирования.

В настоящей работе мы провели сравнительный анализ возмущений, вызванных четырьмя подземными ядерными испытаниями в Северной Корее: 25.05.2009 (00:54 UT, магнитуда 4.7, мощность 2-5.4 кТ), 12.02.2013 (02:57 UT, 5.1, 6-16 кТ), 06.01.2016 (01:30 UT, 5.1, 7-16 кТ), 03.09.2017 (03:30 UT, 6.3, 100 кТ). Информация о параметрах взрывов получена на сайтах Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization (CTBTO), International Seismological Centre (ISC), United States Geological Survey (USGS) [1-3].

Данные и методы обработки

Для регистрации возмущений в ионосфере использовались данные нескольких сетей наземных двухчастотных приемников GPS/ГЛОНАСС, действующих вблизи Корейского полуострова. На основе двухчастотных фазовых измерений по стандартной методике были рассчитаны вариации полного электронного содержания (ПЭС) вдоль лучей «приемник ГНСС – спутник ГНСС». Полученные ряды ПЭС были отфильтрованы в диапазоне периодов 1–10 мин. Для пространственной локализации интегрального ПЭС использовалось классическое представление о формировании ПЭС в ионосферной точке (ИТ), т.е. в точке пересечения луча «приемник ГНСС – спутник ГНСС» с ионосферным слоем на высоте $h_{\max} = 300$ км. Широта и долгота ИТ рассчитывались на основе навигационной информации. Траектории ИТ на карте отражают перемещение спутников ГНСС относительно станции ГНСС.

Для оценки скорости ионосферных возмущений строились диаграммы «дальность-время». На диаграммы наносились положения ИТ, в которых были зарегистрированы первые экстремумы (максимумы или минимумы) возмущений ПЭС, вызванных подземным ядерным испытанием. В качестве дальности выбиралось расстояние от ИТ до эпицентра взрыва на поверхности Земли, чтобы учесть время распространения возмущений в атмосфере до высоты ионосферы.

Результаты и обсуждение

Несмотря на малую мощность событий, отклики ПЭС были зарегистрированы после всех четырех подземных ядерных испытаний. Ионосферные возмущения наблюдались на большем количестве лучей "приемник - спутник" и имели много общего. Примеры возмущений во временных вариациях ПЭС приведены на рис. 1. Форма возмущений ПЭС, вызванных подземными ядерным испытаниями, заметно отличалась от формы возмущений, генерируемых землетрясениями. После землетрясений чаще всего регистрируются отдельные импульсы или (после наиболее сильных землетрясений) волновые пакеты. Возмущения, вызванные рассмотренными взрывами, в большинстве случаев, имели форму протяженного по времени и в пространстве цуга колебаний близкой или убывающей амплитуды (рис. 1). Возмущения начинали регистрироваться через 8-13 мин и наблюдались от 2.5 до 5 часов (~2.5 ч для взрыва 25.05.2009, ~4 ч для взрывов 12.02.2013 и 06.01.2016, более 5 ч для взрыва 03.09.2017).

В первые 30-90 мин (в зависимости от мощности взрыва) наблюдались перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ), распространявшиеся от эпицентра. ПИВ имели средние периоды 1-6 мин и могут быть связаны с акустическими волнами, вызванными подземными ядерными испытаниями в атмосфере Земли. Согласно диаграммам «дальность-время» (примеры таких диаграмм для возмущений, вызванных взрывами 06.01.2016 и 03.09.2017 приведены на рис. 2), можно выделить три типа ПИВ, перемещавшихся с разными скоростями. Быстрые ПИВ имели среднюю скорость ~600 м/с и регистрировались первыми в течение 30–

40 мин после взрыва. Средняя скорость второго типа ПИВ составляла 200-270 м/с; эти ПИВ наблюдались в течение 30–100 мин после взрыва. Медленные ПИВ имели среднюю скорость ~130 м/с и наблюдались в промежутке 40-180 мин после взрыва. ПИВ регистрировались на горизонтальных расстояниях до ~1200-2000 км от места взрыва (~1200–1400 км для взрывов 25.05.2009, 12.02.2013, 06.01.2016, ~2000 км для взрыва 03.09.2017).

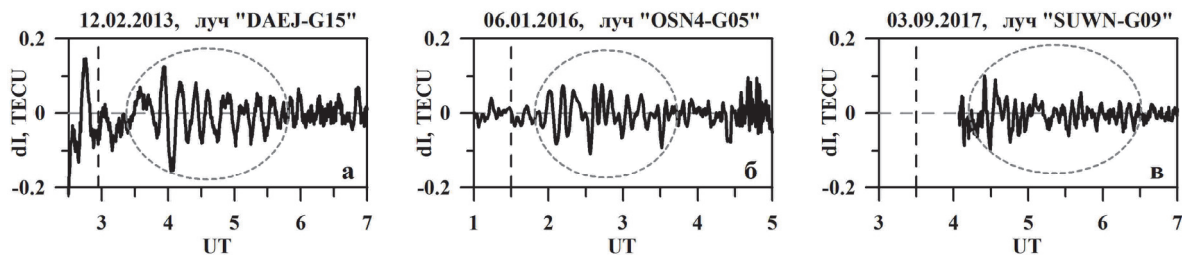


Рис. 1. Примеры возмущений ПЭС, вызванных подземными ядерными испытаниями 12.02.2013 (а), 06.01.2016 (б), 03.09.2017 (в). Вертикальным пунктиром отмечено время взрыва

Поле прохождения ПИВ над местом взрыва в ионосфере остается обширная долгоживущая (более 2.5-3.5 ч) область, «заполненная» возмущениями плазмы. О наличии такой области свидетельствуют длительные и протяженные цуги колебаний, наблюдаемые на многих лучах в окрестности эпицентра. Область формируют малоподвижные возмущения, скорость которых составляет 7-50 м/с. Указанная скорость характеризует не столько перемещение возмущения, сколько время пересечения лучом «приемник-спутник» данного возмущения. Формирование области малоподвижных возмущений зарегистрировано для всех четырех ядерных испытаний, но наиболее ярко эффект проявился после самого сильного взрыва 03.09.2017. В этот день область начала формироваться примерно через 60 мин после взрыва и наблюдалась более 3.5 ч (рис. 2б). Наличие области было подтверждено картами возмущений ПЭС [10], построенными по данным плотной сети GEONET в Японии, объединяющей более 1000 приемников ГНСС. Карты продемонстрировали обширную область вытянутых с юго-запада на северо-восток полосовых возмущений ПЭС над зоной проведения подземного ядерного испытания. Область занимала диапазон широт 25-45N и долгот 120-135E и существовала примерно с 05:00 до 11:00 UT (т.е. в период 1.5-7.5 ч после взрыва). На наш взгляд наиболее вероятной причиной формирования данной области может быть образование стоячих волн в атмосфере. К другим возможным причинам следует отнести развитие неустойчивостей в ионосферной плазме [11] и проникновение в ионосферу аномального электрического поля, обусловленного просочившимися на поверхность радиоактивными веществами [12].

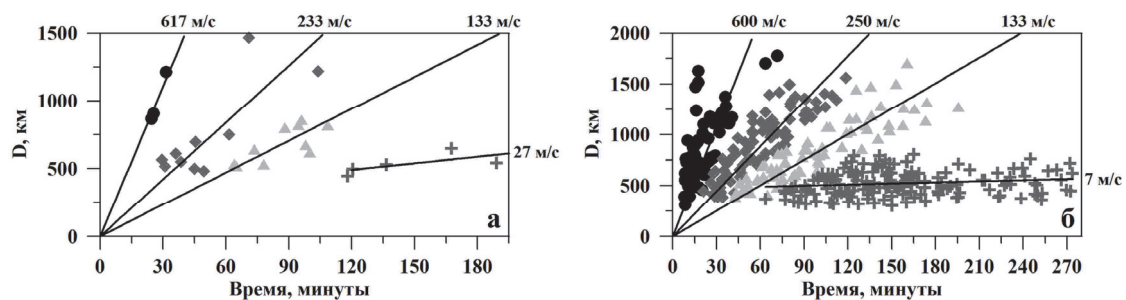


Рис. 2. Диаграммы "дальность-время" для ионосферных возмущений, вызванных подземными ядерными испытаниями 06.01.2016 (а) и 03.09.2017 (б). Различными символами и оттенками серого показаны возмущения, распространявшиеся с различными скоростями; черными линиями - аппроксимирующие прямые. За рамкой указаны значения скорости соответствующих возмущений

Заключение

На основе анализа данных приемных станций GPS/ГЛОНАСС, расположенных вблизи Корейского полуострова, выявлены ионосферные возмущения, обусловленные подземными

ядерными испытаниями 25.05.2009, 12.02.2013, 06.01.2016, 03.09.2017 в Северной Корее. Несмотря на малую мощность событий, отклики ПЭС в ионосфере удалось выделить после всех четырех испытаний. Во всех случаях ионосферные возмущения наблюдались на большом количестве лучей «приемник ГНСС – спутник ГНСС» и имели много общего. Ионосферные возмущения начинали регистрироваться через 8–13 мин после подземного ядерного испытания и наблюдались в течение более 2–5 часов. В первые 30–90 мин (в зависимости от мощности взрыва) наблюдались перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ). Выделено три типа ПИВ распространявшихся от эпицентра со средними скоростями ~600, 200-270, ~130 м/с. ПИВ имели средние периоды 1-6 мин и могут быть связаны с акустическими волнами в атмосфере, вызванным подземными ядерным испытаниями. Для всех четырех испытаний после прохождения ПИВ над местом взрыва наблюдалась обширная долгоживущая (более 2.5-3.5 ч) область малоподвижных возмущений ионосферной плазмы, скорость которых составляла 7–50 м/с. Наиболее ярко этот эффект проявился после самого сильного взрыва 03.09.2017.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (субсидия № 075-ГЗ/Ц3569/278, Перевалова Н.П.) и в рамках госзадания ИПМ ДВО РАН № 075-00459-25-00 (Шестаков Н.В.). В исследовании использовались ресурсы Центра коллективного пользования научным оборудованием «Центр обработки и хранения научных данных ДВО РАН», финансируемого Российской Федерацией в лице Минобрнауки России по соглашению № 075-15-2021-663.

Список литературы

1. Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization (CTBTO). - Режим доступа: <https://www.ctbto.org/our-work/detecting-nuclear-tests> (дата обращения: 10.04.2025).
2. International Seismological Centre (ISC). – URL: <https://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/catalogue/> (дата обращения: 10.04.2025).
3. USGS Earthquake Hazards Program. – URL: <https://earthquake.usgs.gov/> (дата обращения: 10.04.2025).
4. Park J., von Frese R.R.B., Grejner-Brzezinska D.A., Morton Yu., Gaya-Pique L.R. Ionospheric detection of the 25 May 2009 North Korean underground nuclear test // *Geophys. Research Letters*. – 2011. – Vol. 38. – No. 22. – Art. No. L22802.
5. Park J., Grejner-Brzezinska D.A., von Frese R.R.B., Morton Yu. GPS Discrimination of Traveling Ionospheric Disturbances from Underground Nuclear Explosions and Earthquakes // *Navigation*. – 2014. – Vol. 61. – No. 2. – P. 125–134.
6. Yang Y.M., Garrison J.L., Lee S.C. Ionospheric disturbances observed coincident with the 2006 and 2009 North Korean underground nuclear tests // *Geophys. Research Letters*. – 2012. – Vol. 39. – No. 2. – Art. No. L02103.
7. Zhang X., Tang L. Traveling ionospheric disturbances triggered by the 2009 North Korean underground nuclear explosion // *Annales Geophysicae*. – 2015. – Vol. 33. – P. 137–142.
8. Liu Y., Zhou C., Tang Q., Chen G., Zhao Z. Geomagnetic Conjugate Observations of Ionospheric Disturbances in response to North Korea Underground Nuclear Explosion on 3 September 2017 // *Annales Geophysicae*. – 2019. – Vol. 37. – P. 337–345.
9. Liu Y., Zhou C., Zhang X. Q., Liang R., Liu X., Zhao Z. Y. GNSS observations of ionospheric disturbances in response to the underground nuclear explosion in North Korea // *Chinese J. Geophysics*. – 2020. – Vol. 63. – No. 4. – P. 1308–1317 (in Chinese).
10. Perevalova N.P., Dobrynina A.A., Shestakov N.V., Meng G., Wu W., Sankov V.A. Seismic and ionospheric disturbances caused by the 3 September 2017 underground nuclear test in North Korea // *Adv. Space Res.* – 2023. – Vol. 71. – No. 12. – P. 5121–5134.
11. Kelley M. *The Earth's Ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics*. – San Diego: Academic Press, 2009. – 556 p.
12. Boyarchuk K.A., Lomonosov A.M., Pulinetz S.A., Hegai V.V. Impact of radioactive contamination on electric characteristics of the atmosphere. New remote monitoring technique // *BRAS Physics / Supplement, Physics of Vibrations*. – 1997. – Vol. 61. – No 4. – P. 260–266.