

Возмущения в ионосфере, вызванные подземным ядерным испытанием в Северной Корее 3 сентября 2017 года

Н. П. Перевалова¹, Н. В. Шестаков^{2,3}, М. Гоцзе⁴, В. Ву⁴

¹ *Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, 664033, Россия*
E-mail: pereval@iszf.irk.ru

² *Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, 690922, Россия*
E-mail: shestakov.nv@dyfu.ru

³ *Институт прикладной математики ДВО РАН, Владивосток, 690041, Россия*

⁴ *Институт прогнозирования землетрясений Службы землетрясений Китая*
Пекин, 100036, Китай
E-mails: mgj@ief.ac.cn, wwei@ief.ac.cn

На основе анализа данных нескольких сетей станций приёма сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) GPS, ГЛОНАСС проведены исследования ионосферных возмущений, инициированных северокорейским подземным ядерным испытанием (взрывом) 3 сентября 2017 г. Возмущения в ионосфере наблюдались на большом количестве лучей «приёмник ГНСС–спутник ГНСС». Форма возмущений, порождённых подземным ядерным испытанием, заметно отличалась от формы ионосферных аномалий, наблюдаемых после землетрясений. Ионосферные возмущения начали регистрироваться через ~8 мин после взрыва и наблюдались в течение более 5 ч после него. Показано, что в пределах 1,5 ч после взрыва регистрировались преимущественно перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ) с периодами от 1,0 до 9,5 мин, распространявшиеся от эпицентра со средними скоростями порядка 580, 250 и 130 м/с. Эти ПИВ могут быть отнесены к акустическим волнам, вызванным в атмосфере подземным ядерным испытанием. Примерно через 60 мин после взрыва над эпицентром начала формироваться долгоживущая (наблюдалась более 3,5 ч) область малоподвижных возмущений ионосферной плазмы, скорость которых составляла ~8 м/с. Природа и механизмы формирования данной области требуют дальнейшего исследования и моделирования.

Ключевые слова: подземное ядерное испытание, ионосферные возмущения, ГНСС, GPS, ГЛОНАСС

Одобрена к печати: 17.11.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-275-282

Введение

Подземный ядерный взрыв выступает источником различных типов волн как в земной коре, так и в приземном слое атмосферы. Атмосферные волны могут достигать высот ионосферы (100–400 км), вызывая образование перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ). Одним из эффективных методов регистрации ионосферных возмущений в настоящее время становятся глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), к которым относятся GPS (*англ.* Global Positioning System, система глобального позиционирования) и ГЛОНАСС. С помощью приёмников GPS были зарегистрированы ионосферные возмущения, вызванные подземными ядерными испытаниями, проведёнными в Северной Корее в 2006, 2009 и 2017 гг. (Liu et al., 2019, 2020; Park et al., 2011, 2014; Yang et al., 2012; Zhang, Tang, 2015). Наиболее подробно исследованы ионосферные эффекты, инициированные ядерным испытанием 25 мая 2009 г. В работах (Park et al., 2011, 2014) показано, что после этого испытания ПИВ распространялись радиально от места взрыва со скоростью около 273 м/с. Авторы исследования (Yang et al., 2012) для того же события выделили два типа ПИВ: с периодами 2–5 мин и скоростями до 1322 м/с (короткопериодные), которые наблюдались через 7–8 мин после взрыва, а также с периодами 3–12 мин и скоростями 75–453 м/с (длиннопериодные), которые регистрировались через 1–2 ч после взрыва. По данным исследования (Zhang, Tang,

2015), после испытания 25 мая 2009 г. также выявлено два типа возмущений: высокочастотные с периодами 1–2 мин и скоростями 95–585 м/с и низкочастотные с периодами 2–5 мин и скоростями 80–483 м/с. Периоды обнаруженных ПИВ позволяют считать, что эти возмущения обусловлены акустическими волнами. После испытания 9 октября 2006 г. наблюдались только длиннопериодные (3–12 мин) возмущения, параметры которых были близки к характеристикам ПИВ, инициированных испытанием 2009 г. (Park et al., 2014; Yang et al., 2012).

В работе (Liu et al., 2019) представлены результаты регистрации ПИВ, вызванных подземным ядерным испытанием 3 сентября 2017 г., ГНСС-станциями глобальной сети IGS (*англ.* International GNSS Service) в Восточной Азии и Австралии. Были обнаружены ПИВ в районе Корейского п-ова, а также в магнитосопряжённой точке в Южном полушарии. В обоих полушариях ПИВ распространялись радиально от места взрыва с горизонтальной скоростью порядка 280 м/с. Авторами высказано предположение, что зарегистрированные ПИВ обусловлены не акустико-гравитационными волнами (АГВ), а возмущением электрического поля, вызванного подземным ядерным испытанием. Та же методика была позднее применена для анализа ионосферных эффектов подземных ядерных испытаний, проведённых в Северной Корее 25 мая 2009 г., 12 февраля 2013 г. и 6 января 2016 г. (Liu et al., 2020). Анализ дал аналогичные результаты. Исследования (Liu et al., 2019, 2020) показывают, что, по-видимому, электрические поля или электрические токи, генерируемые подземным ядерным взрывом, играют важную роль в формировании ионосферных возмущений в окрестностях ядерного полигона и в магнитосопряжённой области.

В настоящей работе, используя данные региональных сетей наземных двухчастотных приёмников ГНСС, мы выполнили собственный анализ ионосферных возмущений, наблюдавшихся после подземного ядерного испытания, проведённого в Северной Корее 3 сентября 2017 г.

Данные и методы их анализа

Подземный ядерный взрыв мощностью 120 кт в тротиловом эквиваленте и магнитудой M_b 6,3 был произведён 3 сентября 2017 г. в 03:30 UT (*англ.* Universal Time, всемирное время) в Северной Корее на полигоне Пунге-Ри (Punggye-ri, 41,34° с. ш. и 129,04° в. д., *рис. 1*, см. с. 277). Информация о параметрах взрыва получена на сайтах Международного сейсмологического центра (*англ.* International Seismological Centre — ISC, <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/catalogue/>), Организации Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (*англ.* Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization — СТВТО, <https://www.ctbto.org/the-treaty/developments-after-1996/2017-sept-dprk/>), Программы сейсмического риска Геологической службы США (*англ.* Earthquake Hazards Program, USGS — *англ.* United States Geological Survey, <https://earthquake.usgs.gov/>).

Для регистрации возмущений в ионосфере использовались данные нескольких ГНСС-сетей, действующих в Азиатско-Тихоокеанском регионе: международной сети IGS (<http://sopac.ucsd.edu>), комплексной геодинимической сети ДВО РАН (Быков и др., 2020), геодинимической сети Китая (COMONC), Южно-Корейской региональной сети (<ftp://nfs.kasi.re.kr/grps>). Для анализа выбирались станции ГНСС, расположенные вблизи Корейского п-ова (см. *рис. 1*). Обработывались данные спутниковых группировок GPS и ГЛОНАСС. Далее используются обозначения: Gnn и Rnn, где G означает спутник GPS, R — ГЛОНАСС, а nn — системный номер спутника в соответствующей ГНСС (например, G15, R03).

На основе двухчастотных фазовых измерений приёмников ГНСС по стандартной методике были получены ряды изменения наклонного полного электронного содержания (ПЭС, единица измерения TECU = 10^{16} электрон/м²) за временной промежуток 2–4 сентября 2017 г. (Afraimovich et al., 1998; Calais, Minster, 1996; Hofmann-Wellenhof et al., 1992). С целью выделения возмущений, вызванных взрывом, полученные ряды наклонного ПЭС были отфильтрованы в диапазоне периодов 1–10 мин с использованием метода скользящего среднего (Afraimovich et al., 1998) и приведены к вертикальному значению. Вариации ПЭС в день испытания сравнивались с его поведением в предыдущий и последующий дни.

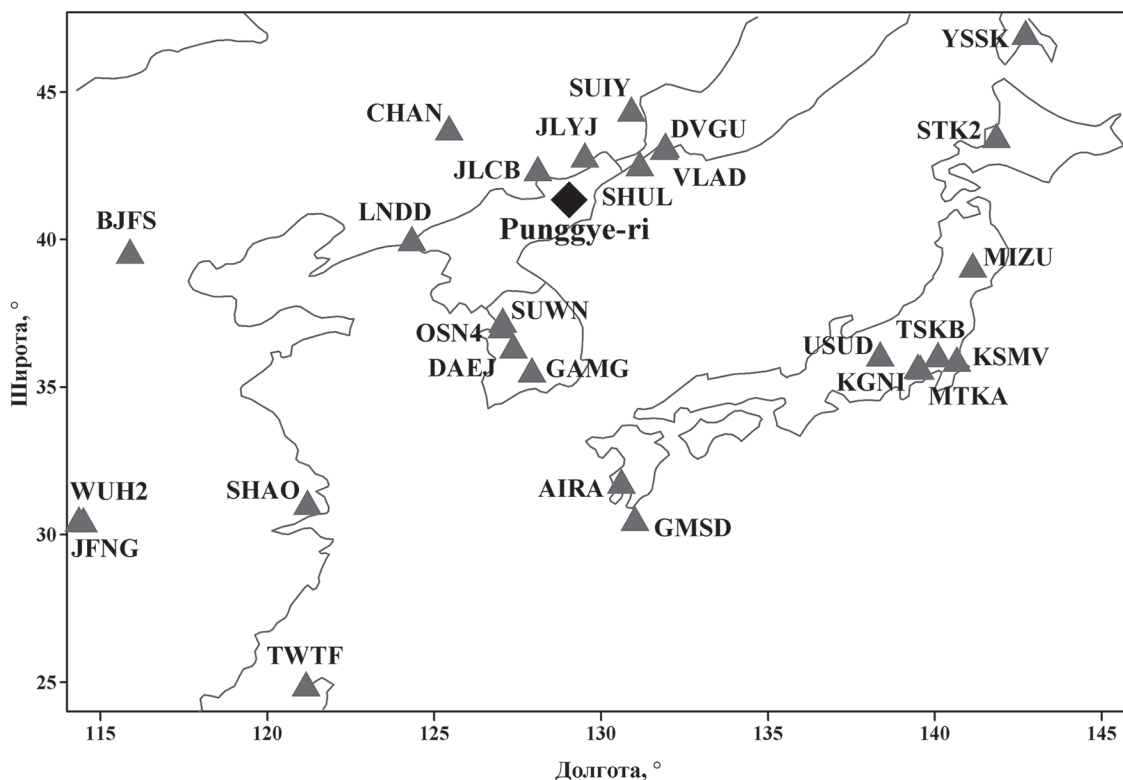


Рис. 1. Станции ГНСС (треугольники), данные которых использованы в настоящем исследовании. Ромбом отмечен ядерный полигон Пунге-Ри

Для пространственной локализации интегрального ПЭС использовалось классическое представление «тонкого ионосферного слоя» (Afraimovich et al., 1998; Calais, Minster, 1996; Hofmann-Wellenhof et al., 1992): поскольку основной вклад в значение ПЭС вносит область в районе максимума слоя $F2$ (высота h_{\max}), принято считать, что ПЭС формируется в ионосферной точке (ИТ), т.е. в точке пересечения луча «приёмник ГНСС – спутник ГНСС» с ионосферным слоем на высоте h_{\max} , которая изменяется в пределах 250–400 км в зависимости от времени года и суток, широты, уровня геомагнитной активности и ряда других факторов. В настоящей работе принято $h_{\max} = 300$ км, что можно рассматривать как среднее значение этой величины (Calais, Minster, 1996). Координаты ИТ (широта, долгота) на высоте h_{\max} рассчитывались на основе навигационной информации, передаваемой спутниками ГНСС. Траектории ИТ на карте отражают перемещение спутников ГНСС относительно станции ГНСС.

В исследуемый период геомагнитная обстановка оставалась спокойной (индекс $Kp = 1-3$, индекс Dst изменялся от -4 до $+12$, <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>), что облегчило идентификацию ионосферных возмущений, вызванных подземным ядерным испытанием.

Результаты и их обсуждение

Ионосферные возмущения, вызванные подземным ядерным испытанием 3 сентября 2017 г., наблюдались на большем количестве лучей «приёмник – спутник» (рис. 2а, б, см. с. 278). Форма возмущений ПЭС (рис. 2в–е), вызванных подземным ядерным испытанием, заметно отличалась от формы возмущений, наблюдаемых после землетрясений. ПИВ, вызванные землетрясениями, чаще всего имеют форму отдельных импульсов, а наиболее сильные землетрясения вызывают возмущения в форме волновых пакетов. После взрыва 3 сентября 2017 г. кроме возмущений в виде одиночных импульсов наблюдались протяжённые по времени и в пространстве цуги колебаний близкой или убывающей амплитуды. Во многих слу-

чаях одиночный импульс сопровождался последующим цугом колебаний (см. рис. 2в–е). Возмущения, обусловленные взрывом, начали регистрироваться через ~8 мин и наблюдались более 5 ч после него. Можно выделить два временных интервала, отличающихся характером регистрируемых ионосферных возмущений.

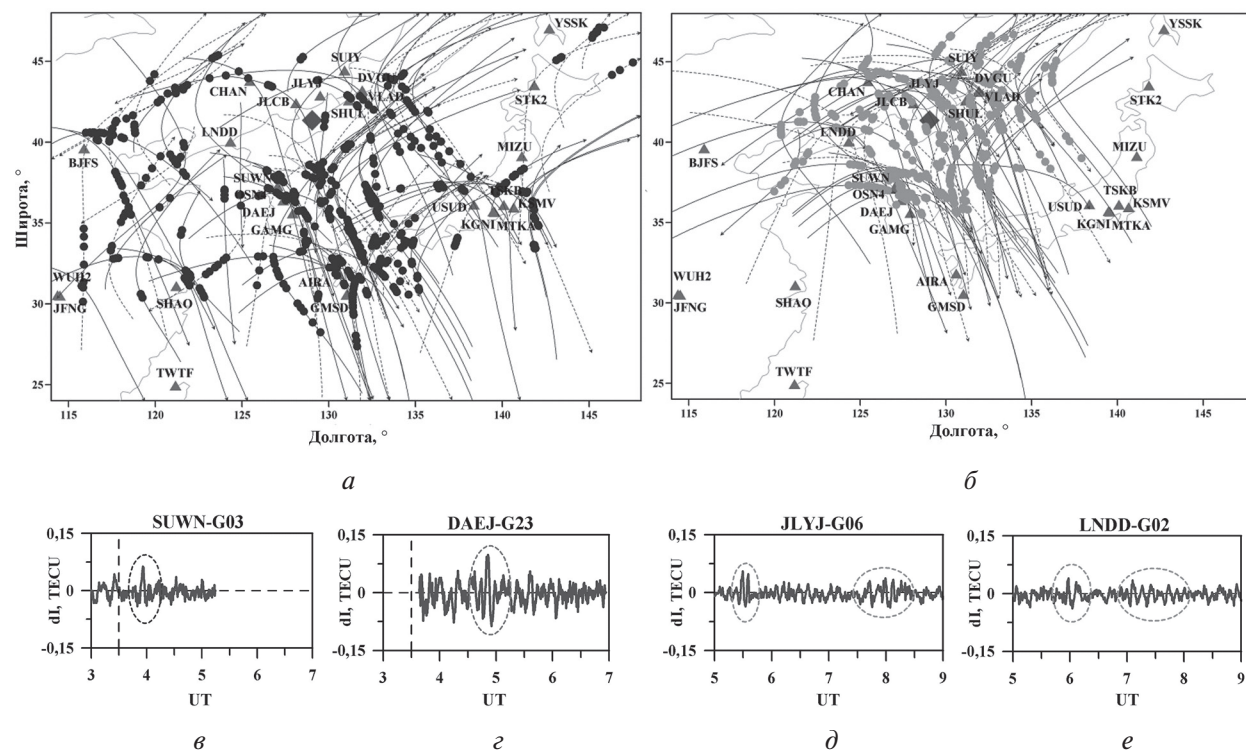


Рис. 2. Пространственное распределение (а, б) и примеры возмущений ПЭС (в–е), вызванных подземным ядерным испытанием 3 сентября 2017 г., в интервалах 03:00–07:00 UT (а, в, з) и 05:00–09:00 UT (б, д, е). Ромбом отмечено место взрыва. Линиями со стрелками показаны траектории ИТ в 03:00–07:00 UT (а) и в 05:00–09:00 UT (б). Сплошные линии соответствуют спутникам GPS, пунктирные — спутникам ГЛОНАСС. Крупными точками показано положение возмущений ПЭС, вызванных взрывом. Вертикальный пунктир на панелях (в, з) отмечает время взрыва

В интервале 03:38–05:00 UT (первые ~1,5 ч после взрыва) наблюдались преимущественно перемещающиеся ионосферные возмущения, вызванные взрывом. Пространственное распределение и примеры зарегистрированных ПИВ представлены на рис. 2а, в, з. Наиболее уверенно ПИВ выделяются на четырёх станциях (SUWN, OSN4, DAEJ, GAMG), расположенных в Южной Корее. Амплитуда возмущений варьировалась в пределах 0,02–0,23 TECU со средним значением 0,05 TECU; периоды менялись от 1,0 до 9,5 мин при среднем значении 4,6 мин. Первое возмущение с амплитудой $A \approx 0,04$ TECU было зарегистрировано на луче SUWN-G22 (станция SUWN – спутник GPS G22) спустя 7,9 мин после взрыва на горизонтальном расстоянии $L \approx 257$ км от эпицентра (под горизонтальным расстоянием от эпицентра понимается расстояние вдоль дуги большого круга между ИТ и проекцией эпицентра взрыва, расположенной на высоте h_{\max}). В течение 9 мин после взрыва были зарегистрированы ещё три возмущения: на луче SUYI-G28 (через 8,5 мин, $L = 77$ км, $A \approx 0,05$ TECU), на луче GAMG-G17 (через 8,5 мин, $L = 556$ км, $A \approx 0,05$ TECU) и на луче SUWN-R16 (через 9,0 мин, $L = 722$ км, $A \approx 0,07$ TECU). Особенность поведения ионосферы в рассматриваемый период заключалась в отсутствии возмущений на горизонтальных расстояниях менее 250 км, за исключением одного из самых первых возмущений, зарегистрированного на луче SUYI-G28 и проходившем практически над эпицентром в момент взрыва. ПИВ, вызванные подземным ядерным испытанием, наблюдались преимущественно к югу, юго-востоку и юго-западу от места взрыва на горизонтальных расстояниях до ~2000 км.

С целью оценки скоростей ПИВ была построена диаграмма «дальность – время» (рис. 3а). На неё нанесены положения ИТ, в которых были зарегистрированы первые экстремумы (максимумы или минимумы) возмущений ПЭС, вызванных подземным ядерным испытанием. В качестве дальности использовалось расстояние D от ИТ до эпицентра взрыва на поверхности Земли, чтобы учесть время распространения возмущений в атмосфере до высоты ионосферы. В качестве времени — время в минутах от момента взрыва. Положения ИТ на диаграмме аппроксимировались прямыми линиями по методу наименьших квадратов в предположении, что возмущения распространялись от эпицентра (сплошные линии на рис. 3а). Скорость ПИВ определялась по наклону аппроксимирующей прямой. Аналогичный метод использовался для оценки скорости ПИВ в работах (Liu et al., 2019; Park et al., 2011).

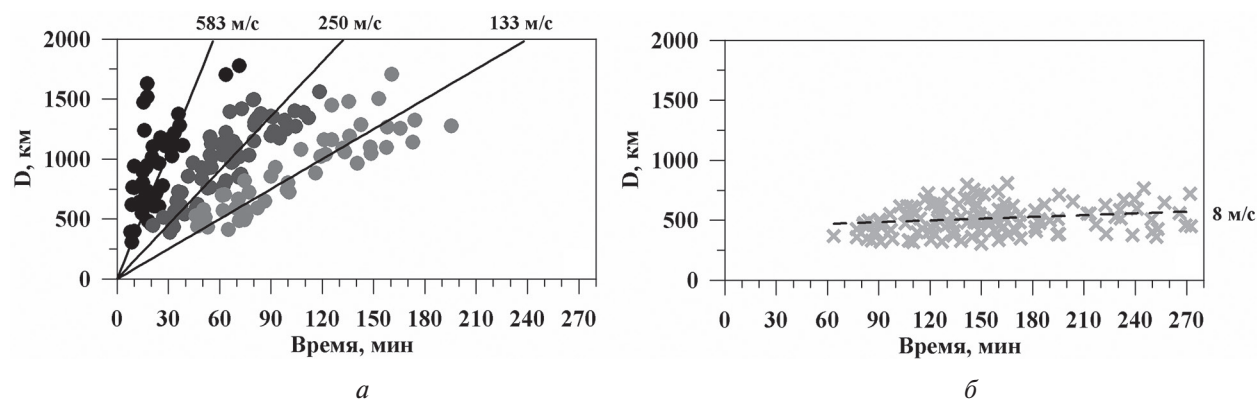


Рис. 3. Диаграммы «дальность – время» для ионосферных возмущений, вызванных подземным ядерным испытанием 3 сентября 2017 г.: а — ПИВ; б — малоподвижные возмущения. Точки соответствуют первым экстремумам возмущений ПЭС. Оттенками серого показаны возмущения, распространявшиеся с различными скоростями; чёрными линиями — аппроксимирующие прямые. Рядом с линией указано значение скорости возмущения

Как видно из рис. 3а, можно выделить три типа ПИВ, перемещавшихся с разными скоростями: быстрые, средние и медленные. Быстрые ПИВ регистрировались первыми, преимущественно в течение ~30 мин после взрыва, и распространялись со средней скоростью около 583 м/с. Второй тип ПИВ наблюдался спустя 20–120 мин после испытания, а его средняя скорость составляла около 250 м/с. Скорость этого типа ПИВ хорошо согласуется с аналогичной оценкой, полученной в работе (Liu et al., 2019). Медленные ПИВ распространялись со средней скоростью около 133 м/с и наблюдались в интервале 45–200 мин после взрыва. Скорости (133–583 м/с) и периоды (меньше 10 мин) позволяют отнести все зарегистрированные ПИВ к акустическим волнам, инициированным в атмосфере данным подземным ядерным испытанием.

В интервале 04:30–08:30 UT наблюдалось достаточно много ионосферных возмущений на горизонтальных расстояниях до 1000 км от эпицентра подземного ядерного испытания. Пространственное распределение и примеры указанных возмущений представлены на рис. 2б, д, е. На рис. 3б приведена диаграмма «дальность – время», построенная для этих возмущений. По сравнению с описанными выше ПИВ, более поздние возмущения имели близкие периоды (от 1,5 до 9,0 мин при среднем значении 4,2 мин) и несколько меньшую амплитуду (от 0,02 до 0,15 ТЕСУ со средним значением 0,04 ТЕСУ). Во многих случаях рассматриваемые возмущения представляли собой длительные цуги колебаний (см. рис. 2д, е). Отличительной особенностью данных возмущений была очень низкая скорость распространения (около 8 м/с, см. рис. 3б). При этом после 06:30 UT наблюдался только этот тип возмущений.

При анализе ионосферных эффектов землетрясений распространяющиеся с разными скоростями ПИВ обычно интерпретируются как различные типы волн,двигающиеся из эпицентра (Chen et al., 2017; Tsugawa et al., 2011). На наш взгляд, вызванные взрывом ПИВ

со скоростями более 100 м/с имеют аналогичную природу. Эти волны появляются первыми и распространяются на большие (до ~2000 км) расстояния. Однако примерно через 60 мин после взрыва в ионосфере в окрестностях эпицентра начинает формироваться обширная область, «заполненная» малоподвижными возмущениями плазмы, напоминающая картину стоячих волн. О наличии такой области свидетельствуют длительные и протяжённые цуги колебаний ПЭС, наблюдаемые в течение 3–3,5 ч на многих лучах в этой области и распространяющиеся с низкими скоростями (около 8 м/с). Такие возмущения можно рассматривать как «неподвижные», которые, практически не перемещаясь, существуют над областью подземного ядерного испытания длительное время (более 3 ч). Природа формирования области «неподвижных» ионосферных возмущений требует отдельного исследования и моделирования. Наиболее вероятными причинами могут быть: образование стоячих волн в атмосфере, развитие неустойчивости в ионосферной плазме (Kelley, 2009), а также проникновение в ионосферу аномального электрического поля, сгенерированного просочившимися на поверхность радиоактивными веществами (Boyarchuk et al., 1997).

Заключение

На основе анализа данных приёмных станций ГНСС, расположенных вблизи Корейского п-ова, выявлены ионосферные возмущения, с большой вероятностью обусловленные подземным ядерным испытанием (взрывом), осуществлённым в Северной Корее 3 сентября 2017 г. Возмущения в ионосфере начали регистрироваться через ~8 мин после взрыва и наблюдались более 5 ч после него. При этом в первые 1,5–2 ч после взрыва регистрировались перемещающиеся ионосферные возмущения с периодами 1,0–9,5 мин, распространявшиеся от эпицентра со скоростями 583, 250 и 133 м/с. Эти перемещающиеся ионосферные возмущения, по всей видимости, связаны с акустическими волнами в атмосфере Земли, вызванными подземным ядерным испытанием. Примерно через 60 мин после взрыва над эпицентром начала формироваться долгоживущая (наблюдалась более 3,5 ч) область малоподвижных возмущений ионосферной плазмы. Причиной формирования данной области может быть образование стоячих волн в атмосфере, развитие плазменной неустойчивости или проникновение в ионосферу аномального электрического поля, вызванного просочившимися на поверхность радиоактивными веществами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Минобрнауки России) (субсидия № 075-ГЗ/Ц3569/278) в части обработки данных и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-05-00509а) в части выполнения исследования и анализа результатов. 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.

Литература

1. Быков В. Г., Шестаков Н. В., Герасименко М. Д., Сорокин А. А., Коновалов А. В., Прытков А. С., Василенко Н. Ф., Сафонов Д. А., Коломиец А. Г., Серов М. А., Пупатенко В. В., Королев С. П., Верхотуров А. Л., Жижерин В. С., Рябинкин К. С. Единая сеть геодинимических наблюдений ДВО РАН: становление, десять лет развития, основные достижения // Вестн. Дальневосточ. отд-ния Российской акад. наук. 2020. № 3. С. 5–24. DOI: 10.37102/08697698.2020.211.3.001.
2. Afraimovich E. L., Palamartchouk K. S., Perevalova N. P. GPS radio interferometry of travelling ionospheric disturbances // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 1998. V. 60. P. 1205–1223.
3. Boyarchuk K. A., Lomonosov A. M., Pulnits 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. V. 61. No. 4. P. 260–266.

4. Calais E., Minster J. GPS detection of ionospheric perturbations following a Space Shuttle ascent // *Geophysical Research Letters*. 1996. V. 23. No. 15. P. 1897–1900.
5. Chen P., Yao Y., Yao W. On the coseismic ionospheric disturbances after the Nepal Mw 7.8 earthquake on April 25, 2015 using GNSS observations // *Advances in Space Research*. 2017. V. 59. P. 103–113.
6. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. *Global Positioning System: Theory and Practice*. Wien; N. Y.: Springer-Verlag, 1992. 327 p.
7. Kelley M. *The Earth's Ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics*. San Diego: Academic Press, 2009. 556 p.
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. V. 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. V. 63. No. 4. P. 1308–1317 (in Chinese).
10. 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 // *Geophysical Research Letters*. 2011. V. 38. No. 22. Art. No. L22802.
11. 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. V. 61. No. 2. P. 125–134.
12. 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.
13. Yang Y. M., Garrison J. L., Lee S. C. Ionospheric disturbances observed coincident with the 2006 and 2009 North Korean underground nuclear tests // *Geophysical Research Letters*. 2012. V. 39. No. 2. L02103.
14. Zhang X., Tang L. Traveling ionospheric disturbances triggered by the 2009 North Korean underground nuclear explosion // *Annales Geophysicae*. 2015. V. 33. P. 137–142.

Disturbances in the ionosphere caused by an underground nuclear test in North Korea on September 3, 2017

N. P. Perevalova¹, N. V. Shestakov^{2,3}, M. Guojie⁴, W. Wu⁴

¹ *Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk 664033, Russia
E-mail: pereval@iszf.irk.ru*

² *Far Eastern Federal University, Vladivostok 690922, Russia
E-mail: shestakov.nv@dvfu.ru*

³ *Institute of Applied Mathematics FEB RAS, Vladivostok 690041, Russia*

⁴ *Institute of Earthquake Forecasting CEA, Beijing 100036, China
E-mails: mgj@ief.ac.cn, wwei@ief.ac.cn*

Based on the analysis of data from several networks of ground-based receivers of global navigation satellite systems (GNSS) GPS, GLONASS, we studied the ionospheric disturbances caused by the underground nuclear test (explosion) realized on September 3, 2017 in North Korea. Disturbances in the ionosphere were observed on a large number of GNSS receiver — GNSS satellite beams. The shape of the disturbances caused by the underground nuclear test was markedly different from the shape of the disturbances observed after earthquakes. Ionospheric disturbances began to be registered ~8 min after the explosion and were observed for more than 5 hours. It is shown that in the first 1.5 h after the explosion, mainly travelling ionospheric disturbances (TIDs) were recorded. TIDs propagated from the epicenter with average velocities of 580, 250, and 130 m/s. TIDs had periods from 1.0 to 9.5 min and can be attributed to acoustic waves caused in the atmosphere by the underground nuclear test. After the TID passed, a long-lived (more than 3.5 h) region of sedentary ionospheric plasma disturbances was observed over the explosion site. The velocity of these disturbances was less than 100 m/s. The reason for the formation of this region requires further research and modeling.

Keywords: underground nuclear test, ionospheric disturbances, GNSS, GPS, GLONASS

Accepted: 17.11.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-275-282

References

1. Bykov V. G., Shestakov N. V., Gerasimenko M. D., Sorokin A. A., Konovalov A. V., Prytkov A. S., Vasilenko N. F., Safonov D. A., Kolomiets A. G., Serov M. A., Pupatenko V. V., Korolev S. P., Verkhotur A. L., Kolomiets A. G., Serov M. A., United observation network for geodynamic monitoring in FEB RAS: formation, 10 years of development and major achievements, *Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossiiskoi akademii nauk*, 2020, No. 3, pp. 5–24 (in Russian), DOI: 10.37102/08697698.2020.211.3.001.
2. Afraimovich E. L., Palamartchouk K. S., Perevalova N. P., GPS radio interferometry of travelling ionospheric disturbances, *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 1998, Vol. 60, pp. 1205–1223.
3. Boyarchuk K. A., Lomonosov A. M., Pulnits 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, pp. 260–266.
4. Calais E., Minster J., GPS detection of ionospheric perturbations following a Space Shuttle ascent, *Geophysical Research Letters*, 1996, Vol. 23, No. 15, pp. 1897–1900.
5. Chen P., Yao Y., Yao W., On the coseismic ionospheric disturbances after the Nepal Mw 7.8 earthquake on April 25, 2015 using GNSS observations, *Advances in Space Research*, 2017, Vol. 59, pp. 103–113.
6. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J., *Global Positioning System: Theory and Practice*, Wien; New York: Springer-Verlag, 1992, 327 p.
7. Kelley M., *The Earth's Ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics*, San Diego: Academic Press, 2009, 556 p.
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, pp. 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, pp. 1308–1317 (in Chinese).
10. 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, *Geophysical Research Letters*, 2011, Vol. 38, No. 22, Art. No. L22802.
11. 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, pp. 125–134.
12. 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.
13. Yang Y. M., Garrison J. L., Lee S. C., Ionospheric disturbances observed coincident with the 2006 and 2009 North Korean underground nuclear tests, *Geophysical Research Letters*, 2012, Vol. 39, No. 2, L02103.
14. Zhang X., Tang L., Traveling ionospheric disturbances triggered by the 2009 North Korean underground nuclear explosion, *Annales Geophysicae*, 2015, Vol. 33, pp. 137–142.