

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.12.15>

УДК: 550.388.2

О ВОЗМОЖНОСТИ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ, ВЫЗВАННЫХ МОЩНЫМИ ПОДЗЕМНЫМИ ВЗРЫВАМИ, МЕТОДАМИ GNSS-РАДИОПРОСВЕЧИВАНИЯ

А.М. Падохин¹, С.Л. Шалимов²

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

² Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта
123242, г. Москва, Б. Грузинская ул., д. 10, стр. 1

Статья поступила в редакцию 27 ноября 2023 г.

Аннотация. С использованием плотных сетей GNSS-приемников проведен анализ ионосферных откликов на два подземных взрыва, имеющих магнитуду меньше, чем существующий порог для детектирования ионосферного отклика на землетрясения. Показано, что при регистрации этих откликов необходимо учитывать возможную анизотропию распространения атмосферных возмущений на ионосферных высотах, как из-за крупномасштабных ветровых структур, так и из-за наклона геомагнитного поля. Учет этих факторов позволяет снизить порог энергии (по сравнению с тем, что установлен для землетрясений) импульсных литосферных источников (взрывов, вулканических эксплозий), отклик на которые еще может быть зарегистрирован в ионосфере.

Ключевые слова: ионосфера, GNSS-зондирование, искусственные ионосферные возмущения, подземные взрывы.

Финансирование: Российский научный фонд проект № 22-27-00182.

Автор для переписки: Падохин Артем Михайлович, padokhin@physics.msu.ru

Введение

Земная атмосфера и ионосфера являются чувствительными индикаторами различного рода возмущений в литосфере и гидросфере Земли как природного, так и антропогенного происхождения. К естественным источникам возмущений относятся, прежде всего, землетрясения [1-4], цунами [5], извержения вулканов [6], тропические циклоны [7], а к искусственным – промышленные и ядерные взрывы [8, 9], запуски космических ракет [10]. Основным механизмом распространения возмущения в верхнюю атмосферу от таких источников считаются акустико-гравитационные волны (АГВ). Из-за сильного уменьшения плотности земной атмосферы с высотой эти волны, по мере распространения вверх, усиливаются и приводят к значительным возмущениям верхней атмосферы и ионосферы. Так, для некоторых наземных источников коэффициент усиления амплитуды волн на ионосферных высотах достигает четырех порядков. Регистрация таких ионосферных возмущений в больших пространственных областях проводится с использованием современных методов дистанционного зондирования верхней атмосферы, например, радиопросвечивания сигналами глобальных спутниковых навигационных систем GNSS.

К настоящему моменту достаточно хорошо изучены ионосферные эффекты сопровождающие сильные землетрясения. Показано, что они имеют многомодовую структуру и зачастую содержат отклики на прохождение волны Релея, а также акустической и гравитационной мод АГВ [2,4]. Чаще всего отклик ионосферы на землетрясения регистрируется вблизи эпицентра через 10-15 мин после основного толчка. Периоды возмущений варьируются в пределах 190-600 с, а ионосферный отклик на землетрясения имеет N-образную форму, которая соответствует классической форме ударной акустической волны (волны сжатия-разряжения). На большой статистике событий в работе [11] показано, что используя методы GNSS-радиопросвечивания, не удастся уверенно зарегистрировать вариации полного электронного содержания (Total Electron Content, TEC) для землетрясения с магнитудой меньше 6.5. Вероятность

регистрации ионосферного отклика на землетрясения с магнитудами близкими к пороговым при этом сильно зависит от механизма очага [12] и геофизической обстановки в момент землетрясения.

В тоже время в ряде работ по исследованию отклика ТЕС на мощные подземные взрывы, включая ядерные, показана возможность детектирования событий, имеющих меньшую зафиксированную магнитуду. Так в работе [13] показана возможность детектирования волнового отклика ТЕС на два подземных ядерных взрыва в Северной Корее – 2009 года с магнитудой 4.7 и 2006 года с магнитудой 4.3. Кроме того, в работе [8] по данным низкоорбитальной радиотомографии зафиксированы ионосферные возмущения после промышленных взрывов на Кольском полуострове с магнитудами 2.4 и 3, которые интерпретировались как долгоживущие искусственные возмущения, связанные с геострофической адаптацией возмущений во вращающейся атмосфере. Таким образом можно ожидать, что при использовании метода GNSS-радиопросвечивания будут наблюдаться некоторые отличия в характеристиках ионосферных возмущений наблюдаемых в случае землетрясений и антропогенных взрывов. Подтверждением этого факта являются результаты кросс-вейвлет анализа волновых форм вариаций ТЕС, выделенных после северокорейских подземных ядерных взрывов 2006 и 2009 годов и после землетрясения Тохоку 2011 года [13], показавшие высокую когерентность между волновыми откликами на оба ядерных взрыва и значительную разницу между откликами на взрывы и землетрясение.

В связи с этим дальнейшее исследование ионосферных откликов на мощные искусственные литосферные возмущения представляет значительный интерес [14]. В настоящей работе проведено исследование ионосферных возмущений, наблюдавшихся после двух достаточно мощных событий на территории США, где существует плотная сеть GNSS приемников (UNAVCO [15] и NOAA CORS [16]). События отличались по типу. Первое представляло собой взрыв, проведённый для имитации и оценки возможности детектирования

подземных ядерных испытаний, второе – промышленный взрыв, связанный с разработкой полезных ископаемых.

1. Методы исследования.

Радиопросвечивание сигналами GNSS позволяет оценивать интегральную характеристику ионосферы – TEC, основной вклад в которое вносит ионосферный слой F. Используя фазовые измерения на паре когерентных рабочих частот GNSS можно оценить относительный наклонный TEC вдоль луча спутник-приёмник (slTEC) с использованием хорошо известного выражения [17]:

$$slTEC = \frac{c}{K} \left(\frac{L_i}{f_i} - \frac{L_j}{f_j} \right) \frac{f_i^2 f_j^2}{f_i^2 - f_j^2} + const, \quad (1)$$

где c – скорость света в вакууме, $K = 40.308 \text{ м}^3/\text{с}^2$, L_i, L_j – фазовые измерения на когерентных рабочих частотах f_i, f_j . Так, например, для системы GPS это может быть любая пара частот из следующего набора: $f_1 = 1575.42$ МГц, $f_2 = 1227.60$ МГц, $f_5 = 1176.45$ МГц. Отметим, что оценка (1) является относительной, т.е. содержит аддитивную константу, связанную с неопределённостью начальной фазы. При этом, если целью является исследовать вариации TEC, как в нашем случае, специально оценивать константу в (1) не требуется. Вариации наклонного TEC в определенном диапазоне периодов могут быть получены из исходных рядов наклонного TEC (1) с использованием полосовых фильтров. Сами вариации обычно географически привязываются к положению подионосферной точки – точки пересечения луча спутник–приемник со сферой радиуса $R_E + h_{IPP}$, где R_E – радиус Земли, а h_{IPP} – высота подионосферной точки, обычно принимаемая за 450 км. Наблюдаемые вариации TEC таким образом можно связать с возмущениями верхней ионосферы, вызванными рассматриваемым событием [1].

В настоящей работе для выделения вариаций ТЕС использовался двухсторонний цифровой фильтра Батерворта 4-го порядка, обеспечивающий нулевой фазовый сдвиг исходного и фильтрованного сигнала и обладающий максимально гладкой амплитудно-частотной характеристикой в полосе пропускания. Рассматривались вариации ТЕС в диапазоне 100-1000 сек. Данный диапазон типичен для проявления ионосферного отклика на литосферные источники возмущений [18]. Анализировались пространственно-временные распределения полученных вариаций ТЕС в окрестностях эпицентра взрыва, а также диаграммы дальность (от эпицентра) – время (от события), для определения характерных скоростей выявленных ионосферных возмущений. При построении диаграмм дальность-время использовались данные со всех доступных лучей спутник-приемник с углом возвышения больше 30 градусов, наблюдаемые значения вариаций ТЕС, нормированные на угол возвышения спутника (картирующую функцию), усреднялись в пространственно-временных ячейках с размерами 1 км по дальности от эпицентра события и 30 сек по времени от начала события.

2. Полученные результаты.

Первое из анализируемых нами событий произошло 18 октября 2023 г в 15:14:59 UTC на полигоне в Неваде, где Национальная администрация ядерной безопасности (NNSA) США провела подземный неядерный взрыв по программе совершенствования методов детектирования ядерных испытаний. Геологическая служба США (USGS) [19] зарегистрировала магнитуду 1.7 и координаты места взрыва (37.204 с.ш., 116.186 з.д). Событие происходило в спокойных геомагнитных условия, планетарный Кр индекс не превышал 3, Dst индекс в течение дня не опускался ниже -31 нТл. В радиусе 500 км от места проведения взрыва были доступны данные более 500 GNSS станций. На рисунке 1 представлена диаграмма дальность – время для вариаций ТЕС в диапазоне 100-1000 сек, полученная во время данного события.

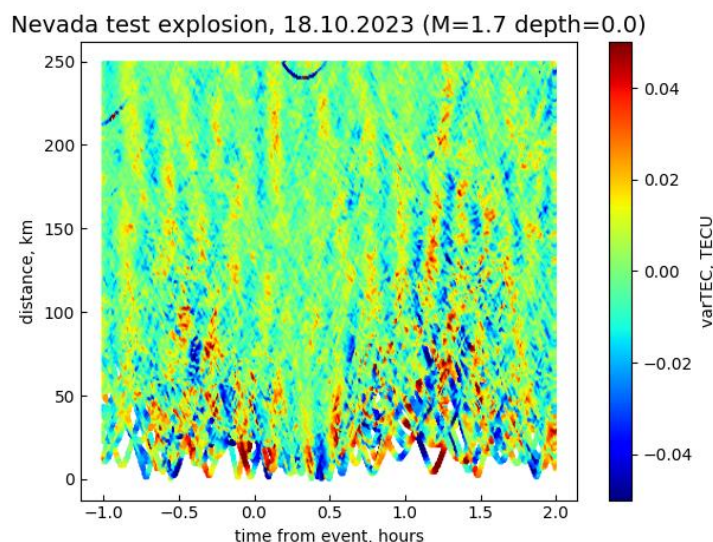


Рис. 1. Диаграмма дальность – время волновых возмущений TEC (100-1000 сек.) во время экспериментального подземного взрыва, Невада 18 октября 2023 г.

Видно, что в период до и после события на диаграмме наблюдается ряд перемещающихся ионосферных возмущений, при этом их амплитуды достаточно невелики и не превышают 0.05 TECU, что обычно принимают за порог обнаружения возмущений при GNSS-просвечивании. Хорошо видно, что до взрыва можно наблюдать возмущения, которые являются результатом интерференции перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ), распространяющихся как в направлении, так и от эпицентра взрыва. Через 30-40 мин после взрыва можно отчётливо наблюдать возмущение на расстояниях ~50-100 км, распространяющееся со скоростью ~280 м/с от эпицентра, оно может быть интерпретировано, как ионосферный отклик (АГВ) на событие. Время распространения возмущения до нижней части F слоя приблизительно соответствует вертикальной скорости атмосферной внутренней гравитационной волны. Далее опять наблюдается встречное распространение АГВ от эпицентра взрыва и присутствующих в утренние часы естественных среднемасштабных ПИВ. Это связано с тем, что типичные ионосферные волновые возмущения, наблюдаемые в этом регионе как фоновые, могут включать ночные среднемасштабные ПИВ, которые распространяются на юго-запад, а также дневные среднемасштабные ПИВ, обычно наблюдаемые зимой и в

равноденствие, распространяющиеся на юго-восток до полудня, но на юго-запад – после полудня; в промежуточные часы наблюдается переход от одного режима распространения к другому, в результате чего хорошо организованные фронтальные структуры исчезают из-за суперпозиции ПИВ, распространяющихся в разных направлениях [20,21].

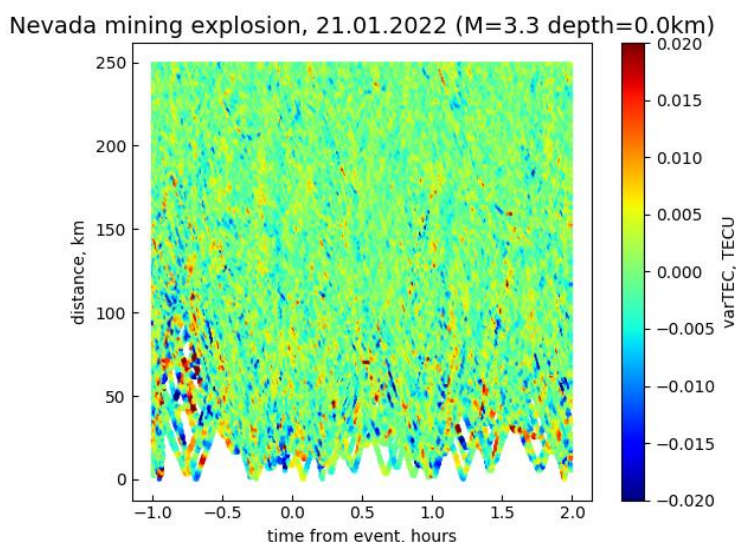


Рис. 2. Диаграмма дальность – время волновых возмущений ТЕС (100-1000 сек.) во время промышленного подземного взрыва, Невада 21 января 2022 г.

Следующее событие представляет собой промышленный взрыв, связанный с разработкой полезных ископаемых. Оно произошло 21 января 2022 г в 04:59:43 UTC в Неваде, США. Геологическая служба США (USGS) зарегистрировала магнитуду 3.3 и координаты места взрыва (40.786 с.ш., 116.212 з.д), что сопоставимо с магнитудами, зарегистрированными во время промышленных взрывов на Кольском полуострове, анализировавшихся в [8]. Событие также происходило в спокойных геомагнитных условиях, планетарный Кр индекс не превышал 1, Dst индекс в течение дня не опускался ниже -20 нТ. При анализе возможных откликов ТЕС на событие использовались приемники сети UNAVCO, аналогичные предыдущему случаю. На рисунке 2 представлена диаграмма дальность – время для вариаций ТЕС в диапазоне 100-1000 сек, полученная во время данного события. Хорошо видно, что амплитуда волновых вариаций ТЕС, наблюдаемых в данном случае, несмотря на достаточно большую

магнитуду события, оказывается меньше, чем в предыдущем случае и составляет ~ 0.02 TECU. Анализ диаграммы не позволяет однозначно выделить возмущения, которые могут быть связаны с исследуемым промышленным взрывом.

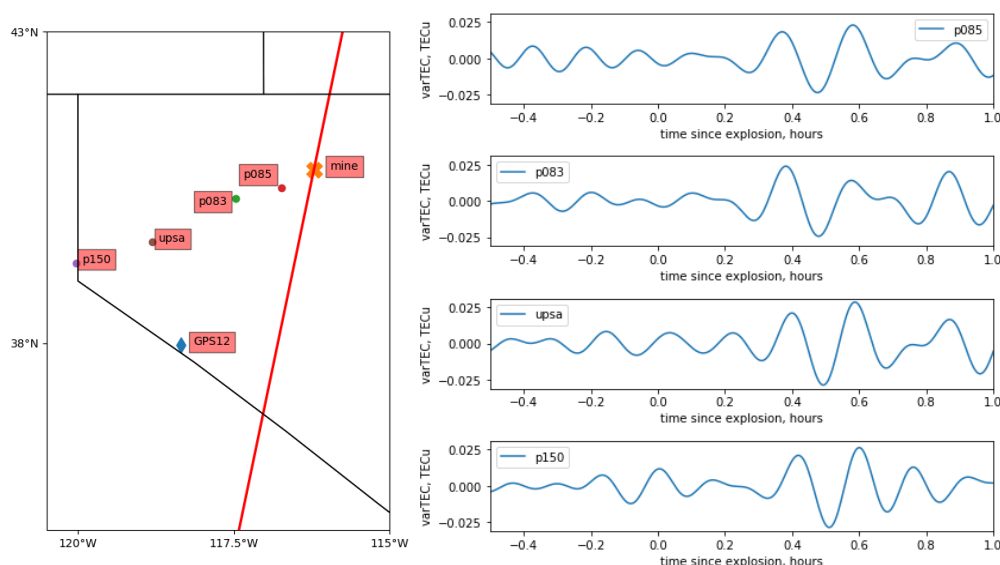


Рис. 3. Геометрия радиопросвечивания(слева) и волновые вариации ТЕС (справа) после промышленного подземного взрыва, Невада 21 января 2022 г. Крестом показан эпицентр взрыва; точками показаны GNSS станции; ромбом показана подионосферная точка GPS12 для станции upsa в момент взрыва; красной линией показано направление горизонтальной компоненты геомагнитного поля.

Следует отметить, что приведенные выше диаграммы дальность-время волновых вариаций ТЕС получены путем усреднения данных со всех спутников и приемников со всех возможных направлений. Вместе с тем с точки зрения возмущений, связанных с распространением АГВ, может существовать выделенное направление нейтрального ветра на ионосферных высотах (напомним, что речь идет о зимнем периоде). При распространении по ветру волны подавляются, против – усиливаются [22]. Кроме того, в большей степени для средних и низких широт, существует выделенное направление, связанное с направлением геомагнитного поля Земли [9], что может приводить к значительным вариациям скорости распространения ПИВ в различных азимутальных направлениях. Таким образом, при малых амплитудах возмущений ТЕС, вызванных искусственным литосферным возмущением, что и наблюдалось в обоих рассмотренных нами случаях, усредненная по всем

направлениям диаграмма дальность-время, может затруднить выделение отклика в TEC на рассматриваемые события тем более на фоне естественной ионосферной изменчивости. В такой ситуации имеет смысл рассматривать GNSS приемники, расположенные только в определенных азимутальных направлениях от эпицентра событий и лучи в направлении единственного спутника, обеспечивающего наилучшую геометрию просвечивания.

Приведем пример такого анализа для второго из рассмотренных нами событий – промышленного взрыва в Неваде 21 января 2022 г. Исходя из изложенных выше соображений и считая роль магнитного поля доминирующей, будем искать ионосферный отклик на данное событие в юго-западном секторе. В данном направлении, по мере удаления от эпицентра события, на расстояниях от 70 до 300 км расположены приемные пункты сети UNAVCO: p085, p081, upsa, p150. Геометрия эксперимента показана на рисунке 3(слева). Показан эпицентр взрыва, станции и спутник, использовавшиеся при радиопросвечивании ионосферы, направление горизонтальной компоненты магнитного поля. Приведенные на рисунке 3(справа) вариации TEC в диапазоне 100-1000сек. наблюдались на данных станциях при просвечивании ионосферы сигналами спутника GPS12. Хорошо заметно распространяющееся после взрыва возмущение с амплитудой ~ 0.02 TECU, что согласуется с результатами, полученными в [9]. Исходя из положения подионосферных точек спутника GPS12 и времени вступления волны на станциях p085 и p150, скорость распространения данного возмущения может быть оценена как 1185 м/с, что близко к скорости акустического сигнала на высотах верхней ионосферы (при этом время появления сигнала также соответствует приходу акустического импульса). Отметим, что при анализе результатов, полученных при просвечивании ионосферы сигналами других спутников на рассматриваемой цепочке приемников, подобное возмущение выявлено не было, что указывает на существенную пространственную анизотропию отклика ионосферы на данный промышленный взрыв.

Заключение

Таким образом, проведенный с использованием плотных сетей GNSS-приемников анализ ионосферных откликов на искусственные литосферные возмущения различной природы, но достаточно малой магнитуды показал, что при регистрации этих откликов необходимо учитывать возможную анизотропию распространения атмосферных возмущений на ионосферных высотах как из-за крупномасштабных ветровых структур, так и из-за наклона геомагнитного поля. Если принять во внимание эти факторы, то можно надеяться на снижение порога (по сравнению с тем, что установлен для землетрясений [11]) энергии импульсных литосферных источников (взрывов, вулканических эксплозий), отклик на которые еще может быть зарегистрирован в ионосфере.

Подчеркнем, что такой вывод относится к использованному в настоящей работе методу GNSS-радиопросвечивания, который, как уже было отмечено, является интегральным. Между тем, ионосферный отклик на импульсные источники (включая землетрясения) может быть зарегистрирован посредством ионосферного или доплеровского зондирования (см. например [18]). Кроме того, после сейсмических событий, как правило, от источника распространяются сейсмические волны. В частности, распространение волн Релея сопровождается генерацией атмосферных акустических волн, которые достигают ионосферных высот. Иными словами, при использовании других инструментов наблюдения пороговая магнитуда события не обязана быть выше 6.5 для того, чтобы ионосферный отклик наблюдался. В частности, в серии афтершоков после землетрясения в Турции 06.02.2023 было несколько событий, имеющих магнитуду $M = 6$, и после прихода волн Релея от этих событий на магнитную обсерваторию был зарегистрирован отклик ионосферы, отразившийся в геомагнитных вариациях [23].

Финансирование: Российский научный фонд проект № 22-27-00182.

Литература

1. Kunitsyn V. E., Nesterov I. A., Shalimov S. L. Japan megathrust earthquake on March 11, 2011: GPS-TEC evidence for ionospheric disturbances //JETP letters. – 2011. – Т. 94. – С. 616-620.
2. Rolland L. M. et al. The resonant response of the ionosphere imaged after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake //Earth, planets and space. – 2011. – Т. 63. – С. 853-857.
3. Rolland L. M. et al. Discriminating the tectonic and non-tectonic contributions in the ionospheric signature of the 2011, Mw7. 1, dip-slip Van earthquake, Eastern Turkey //Geophysical Research Letters. – 2013. – Т. 40. – №. 11. – С. 2518-2522.
4. Jin S., Jin R., Li J. H. Pattern and evolution of seismo-ionospheric disturbances following the 2011 Tohoku earthquakes from GPS observations //Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 2014. – Т. 119. – №. 9. – С. 7914-7927.
5. Rakoto V. et al. Tsunami wave height estimation from GPS-derived ionospheric data //Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 2018. – Т. 123. – №. 5. – С. 4329-4348.
6. Themens D. R. et al. Global propagation of ionospheric disturbances associated with the 2022 Tonga volcanic eruption //Geophysical Research Letters. – 2022. – Т. 49. – №. 7. – С. e2022GL098158.
7. Zakharov V. I., Kunitsyn V. E. Regional features of atmospheric manifestations of tropical cyclones according to ground-based GPS network data //Geomagnetism and Aeronomy. – 2012. – Т. 52. – С. 533-545.
8. Andreeva E. S. et al. Radiotomographical detection of ionosphere disturbances caused by ground explosions //Cosmic Research. – 2001. – Т. 39. – С. 10-14.
9. Calais E. et al. Ionospheric signature of surface mine blasts from Global Positioning System measurements //Geophysical Journal International. – 1998. – Т. 132. – №. 1. – С. 191-202.

10. Ozeki M., Heki K. Ionospheric holes made by ballistic missiles from North Korea detected with a Japanese dense GPS array //Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 2010. – Т. 115. – №. A9.
11. Perevalova N. P. et al. Threshold magnitude for ionospheric TEC response to earthquakes //Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2014. – Т. 108. – С. 77-90.
12. Astafyeva E., Heki K. Dependence of waveform of near-field coseismic ionospheric disturbances on focal mechanisms //Earth, Planets and Space. – 2009. – Т. 61. – С. 939-943.
13. Park J. et al. GPS discrimination of traveling ionospheric disturbances from underground nuclear explosions and earthquakes //Navigation: Journal of the institute of navigation. – 2014. – Т. 61. – №. 2. – С. 125-134.
14. Huang C. Y. et al. Ionospheric detection of explosive events //Reviews of Geophysics. – 2019. – Т. 57. – №. 1. – С. 78-105.
15. EarthScope Consortium operates the National Science Foundation’s Geodetic Facility for the Advancement of Geoscience (GAGE) and Seismological Facility for the Advancement of Geoscience (SAGE). URL: <https://unavco.org>
16. The NOAA CORS Network (NCN) URL: <https://geodesy.noaa.gov/CORS/>
17. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Wasle E. GNSS–global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more. – Springer Science & Business Media, 2007.
18. Гохберг М. Б., Шалимов С. Л. Воздействие землетрясений и взрывов на ионосферу. – Федеральное государственное унитарное предприятие Академический научно-издательский, производственно-полиграфический и книгораспространительский центр Наука, 2008.
19. U.S. Geological Survey. URL: <https://usgs.gov>
20. Kotake N. et al. Statistical study of medium-scale traveling ionospheric disturbances observed with the GPS networks in Southern California //Earth, planets and space. – 2007. – Т. 59. – С. 95-102.

21. Tsugawa T. et al. Medium-scale traveling ionospheric disturbances detected with dense and wide TEC maps over North America //Geophysical Research Letters. – 2007. – Т. 34. – №. 22.
22. Medvedev A. V. et al. Relation of internal gravity wave anisotropy with neutral wind characteristics in the upper atmosphere //Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 2017. – Т. 122. – №. 7. – С. 7567-7580.
23. Рябова С.А., Шалимов С.Л. Отклик геомагнитного поля на землетрясение в Турции 06.02.2023 // Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений: XIII международная конференция, с. Паратунка, Камчатский край, 25 – 29 сентября 2023 г.: сб. тез. докл. Паратунка: ИКИР ДВО РАН, 2023. 126 с.

Для цитирования:

Падохин А.М., Шалимов С.Л. О возможности детектирования ионосферных возмущений, вызванных мощными подземными взрывами, методами GNSS-радиопросвечивания. // Журнал радиоэлектроники. – 2023. – №. 12. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.12.15>