

С.В. ПАНАСЕНКО, канд. физ.-мат. наук, н.с., Институт ионосферы, Харьков;
А.О. МАМЕДОВ, магистр, студент, НТУ “ХПИ”

ОБНАРУЖЕНИЕ ПЕРЕМЕЩАЮЩИХСЯ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИХ ВАРИАЦИЯХ МОЩНОСТИ НЕКОГЕРЕНТНО РАССЕЯННОГО СИГНАЛА

Выявлены временные интервалы, на которых мощность некогерентно рассеянного радиосигнала испытывала квазипериодические вариации с периодами 5 – 120 мин на высотах 100 – 400 км. В предположении, что эти вариации вызваны прохождением перемещающихся ионосферных возмущений, определены их параметры. Показано, что использование зондирующего импульса длительностью 663 мкс приводит к завышенной оценке вертикальной фазовой скорости волновых процессов на нижних высотах.

Ключевые слова: мощность радиосигнала, квазипериодические вариации, волновые процессы, параметры перемещающихся ионосферных возмущений.

Введение. Акустико-гравитационные волны (АГВ) являются важной составляющей динамических процессов в атмосфере Земли. Они играют ключевую роль в переносе импульса и энергии между различными атмосферными областями, способствуя взаимодействию подсистем в системе Земля – атмосфера – геокосмос. АГВ могут генерироваться движением солнечного терминатора, солнечными затмениями, землетрясениями и т. д. Большинство крупномасштабных АГВ возникают в высоких широтах во время вариаций космической погоды и распространяются почти горизонтально к экватору. Источники среднемасштабных АГВ обычно локализованы в нижней атмосфере и представляют собой движения погодных фронтов, грозы, струйные течения и т. д. Кроме естественных, существуют и искусственные источники АГВ, такие как мощные взрывы, старты ракет и модификация ионосферы мощным радиоизлучением (см., например, [1]).

Многообразие источников, а также существенная зависимость параметров АГВ от места наблюдения и гелиогеофизических условий являются причинами отсутствия адекватных моделей этих волновых процессов. Поэтому актуальной является задача обнаружения и оценки параметров АГВ над каждым отдельным регионом земного шара в течение длительного интервала времени и в широком диапазоне высот.

Ионосферными проявлениями АГВ являются перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ). При прохождении ПИВ имеют место квазипериодические вариации концентрации электронов, температуры ионов и электронов и других ионосферных параметров. Поскольку мощность некогерентно рассеянного (НР) сигнала прямо пропорциональна концентрации электронов, существует принципиальная возможность обнаружения ПИВ с использованием данных харьковского радара НР.

© С.В. Панасенко, А.О. Мамедов, 2013

Результаты предыдущих исследований волновых возмущений в ионосфере с помощью харьковского радара, описаны, в частности, в [2 – 4].

Целью работы является анализ квазипериодических вариаций мощности некогерентно рассеянного сигнала, вызванных прохождением перемещающихся ионосферных возмущений над Харьковом, а также оценка параметров этих возмущений.

Данные и методы их обработки. Для нахождения параметров ПИВ использовались временные зависимости мощности НР радиосигнала, полученные с помощью харьковского радара на протяжении 2010 – 2013 гг. в интервалы времени, близкие к весеннему и осеннему равноденствиям, а также зимнему и летнему солнцестояниям. Эти данные вначале подвергались предварительной фильтрации с целью удаления различных помех в соответствии с методикой, описанной в [5]. Далее проводилась статистическая обработка, приведенная в [2], с небольшими улучшениями. В частности, для вычисления тренда использовалась аппроксимация мощности НР сигнала полиномом 3-го порядка по методу наименьших квадратов на интервале времени 120 мин с шагом 1 мин. Это позволило более эффективно отфильтровать аperiodические вариации сигнала, чем при нахождении тренда методом скользящего среднего, как описано в [2]. Однако, при этом также происходит некоторое уменьшение амплитуд квазипериодических процессов. Сравнение результатов, полученных с помощью приведенной в [2] и слегка модифицированной статистической обработки представлены на рис. 1 и 2.

При последующем анализе определялись интервалы времени, на которых мощность НР сигнала испытывала квазипериодические вариации длительностью не менее двух периодов и в широком диапазоне высот. Для уточнения параметров этих возмущений применялась полосовая фильтрация с использованием цифрового фильтра [6].

Результаты и обсуждение. На рис. 3 представлены примеры высотно-временных зависимостей относительных вариаций мощности НР сигнала совместно с отношением сигнал / шум q , полученных при зондировании ионосферы радиоимпульсом длительностью $\tau \approx 135$ мкс (высотное разрешение $\Delta h \approx 20$ км) для двух исследуемых суток. Как видно из рисунка, на фоне случайных вариаций мощности, четко прослеживаются ее квазипериодические вариации особенно на высотах 150 – 300 км. При этом имеет место запаздывание фазы колебаний с уменьшением высоты, а также некоторое увеличение их относительных амплитуд вблизи утреннего и вечернего солнечного терминаторов. Интересно, что такое же поведение присуще и высотным профилям q (см. рис. 3).

Подобные фазовые профили имеют и наблюдаемые различными авторами АГВ / ПИВ, если их источники расположены на Земле либо в нижней атмосфере, а вертикальная групповая скорость направлена вверх (см., например, [7 – 10]).

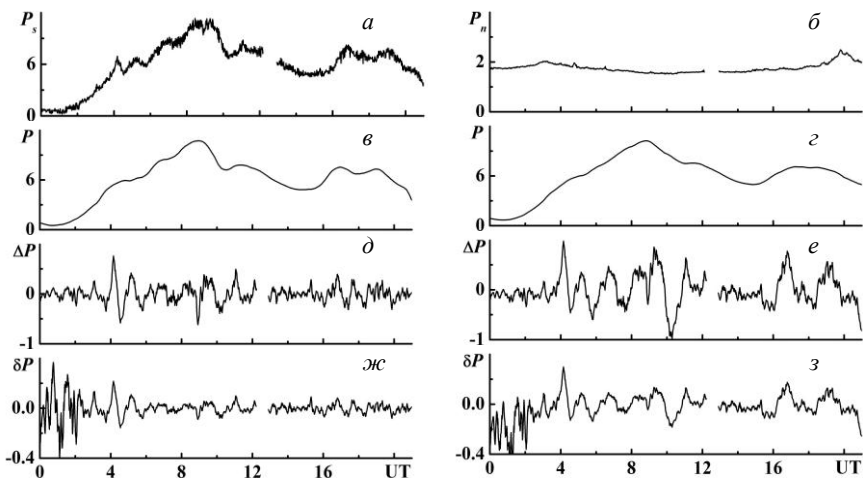


Рис. 1 – Этапы статистической обработки данных радара НР, полученных 29 августа 2012 г. для высоты 255 км: временные зависимости мощности сигнала (*a*) и шума (*б*); тренды, найденные с помощью аппроксимации полиномом 3-го порядка (*в*) и методом скользящего среднего (*з*); абсолютные (*д*, *е*) и относительные (*жс*, *з*) вариации мощности НР сигнала, вычисленные с использованием трендов, найденных аппроксимацией полиномом 3-го порядка (*д*, *жс*) и методом скользящего среднего (*е*, *з*)

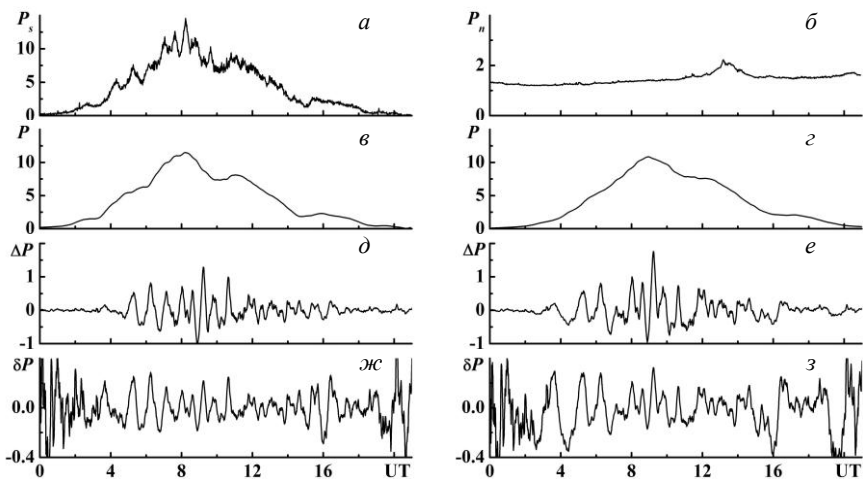


Рис. 2 – То же, что и на рис. 1, для 23 ноября 2012 г. и высоты 225 км

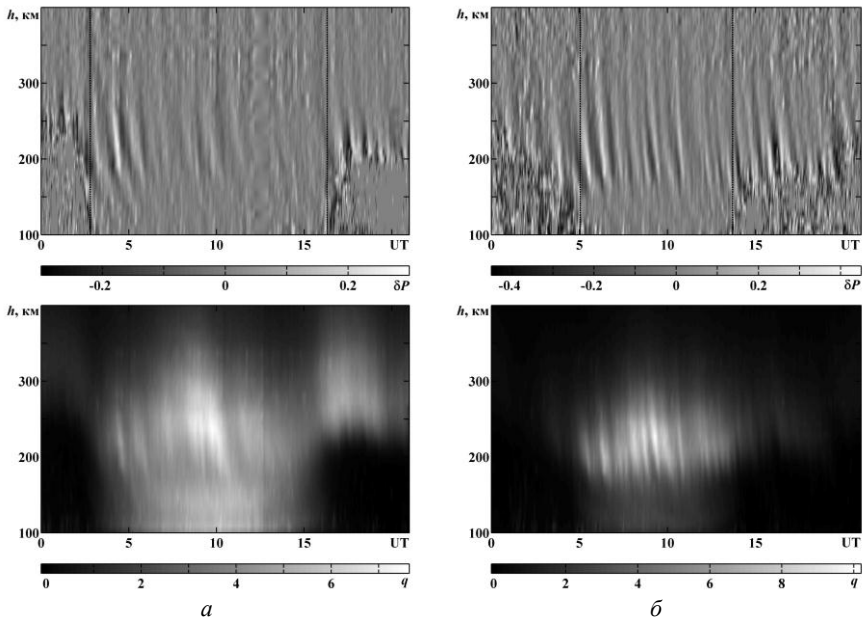


Рис. 3 – Относительные вариации мощности НР сигнала (верхняя панель) и отношение сигнал / шум (нижняя панель) для 29 августа (*а*) и 23 ноября (*б*) 2012 г. Вертикальными пунктирными линиями показано прохождение утреннего и вечернего солнечного терминаторов на поверхности Земли.

В предположении, что обнаруженные квазипериодические вариации мощности вызваны прохождением АГВ / ПИВ над местом наблюдения, нами были оценены относительные амплитуды δ_m , вертикальные фазовые скорости v_z и вертикальные длины волн λ_z последних. Результаты этих оценок для двух суток представлены на рис. 4. Из рисунка видно, что 29 августа и 23 ноября 2012 г. значения δ_m лежали в пределах 0,03 – 0,15. С ростом высоты эти амплитуды вначале увеличивались за счет уменьшения плотностей нейтральной и ионизирующей составляющих атмосферы, достигали максимума на высотах 180 – 250 км и далее уменьшались за счет усиления роли молекулярной вязкости, теплопроводности и амбиполярной диффузии. С этими процессами связано увеличение с ростом высоты вертикальных фазовой скорости и длины волны, которые к тому же еще повышались за счет увеличения скорости звука [11]. Значения v_z обычно лежали в пределах 50 – 200 м/с, а λ_z – 100 – 900 км (см. рис. 4).

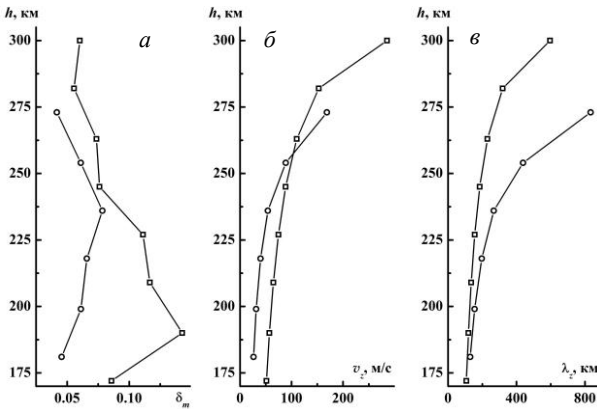


Рис. 4 – Высотные профили относительных амплитуд (а), вертикальных фазовой скорости (б) и длины волны (в) для ПИВ, обнаруженных 29 августа 2012 г. (кружки), $T \approx 85$ мин и 23 ноября 2012 г. (квадраты), $T \approx 35$ мин

Основным недостатком при зондировании ионосферы импульсами с $\tau \approx 135$ мкс является невозможность определения температур электронов и ионов. Поэтому данный импульс используется лишь как дополнительный, а основным является импульс с $\tau \approx 663$ мкс [12].

На рис. 5 представлены высотные зависимости v_z ПИВ, оцененные по данным, полученным одновременно с помощью этих двух импульсов.

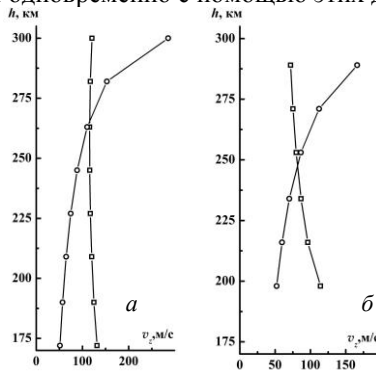


Рис. 5 – Сравнение оценок вертикальной фазовой скорости ПИВ в диапазоне периодов: а – 20 – 40 мин и б – 40 – 80 мин, полученных 23 ноября 2012 г. с использованием зондирующих радиимпульсов с $\tau \approx 135$ мкс (кружки) и $\tau \approx 663$ мкс (квадраты)

Как видно из рисунка, значение v_z , оцененное по данным, полученным с помощью импульса с $\tau \approx 663$ мкс в среднем близко к 100 м/с и слабо зависит от высоты. На высотах 170 – 250 км имеет место завышение v_z на 70 – 20 м/с, а на высотах 250 – 300 км – ее занижение на величину вплоть до 150 м/с. Действительно, при импульсном зондировании оценивается

среднее значение v_z . При $\tau \approx 663$ мкс $\Delta h \sim \lambda_z$ и имеет место более существенное различие между оценкой и реальным значением v_z , чем в случае применения импульса с $\tau \approx 135$ мкс, для которого $\Delta h < \lambda_z$. Этот факт необходимо учитывать при оценке параметров ПИВ температур электронов и ионов, а также ПИВ концентрации электронов, если данные, полученные с помощью радиоимпульса с $\tau \approx 135$ мкс, имеют низкие значения q (см. рис. 3).

Выводы. Таким образом, анализ квазипериодических вариаций мощности некогерентно рассеянного сигнала в широком диапазоне высот позволяет обнаружить перемещающиеся ионосферные возмущения и оценить их параметры. Показано, что эти возмущения в диапазоне периодов 5 – 120 мин на высотах 100 – 400 км имеют относительные амплитуды 0,03 – 0,15; вертикальные фазовые скорости 50 – 200 м/с и вертикальные длины волн 100 – 900 км. Выявлено существенное завышение оценки вертикальной фазовой скорости на низких высотах (100 – 250 км) при использовании данных, полученных с помощью зондирующего импульса длительностью 663 мкс.

Список литературы: 1. Chernogor L.F. The Earth-atmosphere-geospace system: main properties and processes / L.F. Chernogor // International Journal of Remote Sensing. – 2011. – V. 32, No 11. – P. 3199 – 3218. 2. Бурмака В.П. Результаты исследования волновых возмущений в ионосфере методом некогерентного рассеяния / Бурмака В.П., Таран В.И., Черногор Л.Ф. // Успехи современной радиоэлектроники. – 2005. – № 3. – С. 4 – 35. 3. Burmaka V.P. Wave Activity in the Ionosphere during the Magnetospheric Storm of November 7 – 10, 2004 / V.P. Burmaka, L.F. Chernogor // Geomagnetism and Aeronomy. – 2011. – V. 51, No 3. – P. 305 – 320. 4. Domnin I.F. Results of Radiophysical Study of Wave Disturbances in the Ionospheric Plasma During Its Heating by High-Power HF Radio Transmission of “Sura” facility / I.F. Domnin, S.V. Panasenko, V.P. Uryadov, L.F. Chernogor // Radiophysics and Quantum Electronics. – 2012. – V. 55, No 4. – P. 253 – 265. 5. Панасенко С.В. Фильтрация временных вариаций мощности некогерентно рассеянного сигнала при наличии нерегулярных помех и сбоях аппаратуры / С.В. Панасенко // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. Радіофізика та іоносфера. – 2011. – № 44. – С. 40 – 44. 6. Лизунов Г.В. Спектральный анализ спутниковых измерений атмосферных гравитационных волн / Г.В. Лизунов, А.А. Кузьмич // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. Радіофізика та іоносфера. – 2010. – № 48. – С. 57 – 63. 7. Tedd B.L. The Height Dependence of TID and Gravity Wave Parameters / B.L. Tedd, M.G. Morgan, K.A. Ballard // J. Geophys. Res. – 1984. – V. 89, No A9. – P. 9023 – 9033. 8. Hocke K. Phases and amplitudes of TIDs in the high latitude F-region observed by EISCAT / K. Hocke, K. Shlegel, G. Kirchengast // J. Atm. Terr. Phys. – 1996. – V. 58, No 1 – 4. – P. 245 – 255. 9. Medvedev A.V. Method for Studying the Spatial–Temporal Structure of Wave-Like Disturbances in the Ionosphere / A.V. Medvedev, K.G. Ratovsky, M.V. Tolstikov, D.S. Kushnarev // Geomagnetism and Aeronomy. – 2009. – V. 49, No 6. – P. 775 – 785. 10. Djuth F.T. Arcibo’s thermospheric gravity waves and the case for an ocean source / F.T. Djuth, L.D. Zhang, D.J. Livneh et al. // J. Geophys. Res. – 2010. – V. 115, A08305, doi:10.1029/2009JA014799. 11. Брюнелли Б.Е. Физика ионосферы. / Б.Е. Брюнелли, А.А. Намгаладзе. – М.: Наука, 1988. – 522 с. 12. Пуляев В.А. Определение параметров ионосферы методом некогерентного рассеяния радиоволн / Пуляев В.А., Дзюбанов Д.А., Домнин И.Ф. – Х.: Підручник, 2011. – 240 с.

Поступила в редколлегию 19.11.2013

Виявлення рухомих іоносферних збурень у квазіперіодичних варіаціях потужності некогерентно розсіяного сигналу / С.В. Панасенко, А.О. Мамедов // Вісник НТУ “ХПІ”. Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ “ХПІ”, 2013. – № 33 (1066). – С. 12-18. Бібліогр.: 12 назв.

Виявлено часові інтервали, на яких потужність некогерентно розсіяного сигналу мала квазіперіодичні варіації з періодами 5 – 120 хв на висотах 100 – 400 км. За припущення, що ці варіації викликані проходженням рухомих іоносферних збурень, визначені їх параметри. Показано, що використання зондуючого імпульсу тривалістю 663 мкс призводить до суттєво завищеної оцінки вертикальної фазової швидкості хвильових процесів на нижніх висотах.

Ключові слова: потужність радіосигналу, квазіперіодичні варіації, хвильові процеси, параметри рухомих іоносферних збурень.

Time intervals with incoherent scatter signal power varying quasi-periodically with periods of 5 – 120 min at altitudes between 100 km and 400 km are detected. Assuming these variations are caused by passage of travelling ionospheric disturbances, their parameters are estimated. Using a 663 μ s transmitted pulse is shown to result in overestimation of vertical phase velocity of wave processes at low altitudes.

Keywords: radio signal power, quasi-periodic variations, wave processes, parameters of travelling ionospheric disturbances.