

УДК 621.396.98:629.783

**ПАРАМЕТРЫ ПЕРЕМЕЩАЮЩИХСЯ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ,
ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫЕ ПРИ ПОМОЩИ ЦИФРОВОГО ИОНОЗОНДА****В.Л. Дорохов, Ю.Б. Милованов, Ю.П. Федоренко***Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61022, Украина
e-mail: FedorenkoYP@gmail.com*

Поступила в редакцию 10 ноября 2017 г.

Експериментально підтверджено лінійне збільшення часових напівперіодів АГВ/ПІВ з збільшенням часу спостереження при фіксованій відстані між пунктом спостереження і джерелом збурення. Критична частота і віртуальна висота максимуму шару F2, $f_oF2(t)$ і $h_o'F2(t)$, вимірювалися цифровим іонозондом з інтервалом в одну хвилину. Підтверджено, що: 1) відносна амплітуда ПІВ пропорційна тривалості часового напівперіоду, 2) максимуми $h_o'F2(t)$ відповідають мінімумам $f_oF2(t)$ і навпаки. В більшості випадків часова затримка між відповідними екстремумами кривих $f_oF2(t)$ і $h_o'F2(t)$ складає 4 – 15 хв.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ионосфера, ионозонд, АГВ/ПІВ, модель, часові напівперіоди, відносна амплітуда, лінійна залежність, зв'язок між екстремумами $f_oF2(t)$ і $h_o'F2(t)$.

Експериментально підтверджено лінійне збільшення часових напівперіодів АГХ/ПІЗ із збільшенням часу спостереження при фіксованій відстані між пунктом спостереження і джерелом збурення. Критична частота і віртуальна висота максимуму шару F2, $f_oF2(t)$ і $h_o'F2(t)$, вимірювалися цифровим іонозондом з інтервалом в одну хвилину. Підтверджено, що: 1) відносна амплітуда ПІЗ пропорційна тривалості часового напівперіоду, 2) максимуми $h_o'F2(t)$ відповідають мінімумам $f_oF2(t)$ і навпаки. В більшості випадків часова затримка між відповідними екстремумами кривих $f_oF2(t)$ і $h_o'F2(t)$ складає 4 – 15 хв.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ионосфера, ионозонд, АГХ/ПІЗ, модель, часові напівперіоди, відносна амплітуда, лінійна залежність, зв'язок між екстремумами $f_oF2(t)$ і $h_o'F2(t)$.

For a fixed distance between the measuring station and disturbance source experimentally confirmed that the temporal AGW/TID half-periods were linearly increasing when the observation time increase. The critical frequency and virtual height of the F2 layer maximum, $f_oF2(t)$ and $h_o'F2(t)$, were measured by a digital ionosonde with an interval of 1 min. It was confirmed that the relative TID amplitude is proportional to the duration of the time half-period and the maxima of $h_o'F2(t)$ correspond to the minima of $f_oF2(t)$ and vice versa. In most cases, the time delay between the corresponding extrema of the curves $f_oF2(t)$ and $h_o'F2(t)$ are equal to 4 – 15 minutes.

KEY WORDS: ionosphere, ionosonde, AGW/TID, model, temporal half-periods, linear dependence, correlation between $f_oF2(t)$ and $h_o'F2(t)$.

ВВЕДЕНИЕ

Акустико-гравитационные волны (АГВ) и генерируемые ими перемещающиеся ионосферные возмущения (ПІВ) играют важную роль в физике атмосферы и ионосферы. Исследованию АГВ/ПІВ посвящено большое количество работ (см., например, [1 – 10]). Параметры АГВ/ПІВ существенно зависят от состояния атмосферной и космической погоды, места наблюдения, средств наблюдения и т. д.

Актуальной задачей является построение моделей АГВ/ПІВ. Для этого необходимо знать их статистически достоверные параметры.

Цель настоящей работы – изложение результатов наблюдений параметров АГВ/ПІВ, выполненных в радиофизической обсерватории Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина в 2017 г.

ПАРАМЕТРЫ ИОНОЗОНДА И МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Цифровой ионозонд расположен на радиофизической обсерватории Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина (РФО) с географическими координатами $\varphi = 49.63^\circ \text{N}$, $\lambda = 36.32^\circ \text{E}$. Он излучает зондирующие радиоимпульсы длительностью 100 мкс с частотой следования 125 Гц и мощностью до 1.5 кВт в импульсе. Несущая частота радиоимпульсов изменяется в диапазоне 1.5 – 8 МГц с временной дискретностью 0.11 с [11]. Аппаратурные погрешности измерения критических частот и действующих высот составляет соответственно 16 кГц и 2 км.

Массивы цифровых ионограмм, зарегистрированных с минутной временной дискретностью, подвергались ручной обработке при помощи программы полуавтоматической оцифровки основных параметров F2-области: критической частоты обыкновенной волны f_oF2 и минимальной действующей высоты $h_o'F2$ следа отражений обыкновенной волны от наивысшего слоя в области F. Регистрировались также время излучения начального радиоимпульса – частоты зондирования (время начала ионограммы), время приёма f_oF2 и время измерения $h_o'F2$. Для частичной компенсации неточностей считывания оператором указанных параметров области F2 временные зависимости $f_oF2(t)$ и $h_o'F2(t)$ подвергались

сглаживанию методом скользящего среднего с интервалом 10 мин и дискретностью скольжения в одну минуту.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На РФО с 18 по 22 сентября 2017 г. при помощи цифрового ионозонда получена серия суточных измерений $f_oF2(t)$ и $h_oF2(t)$ с минутной временной дискретностью. Результаты их предварительного анализа показаны на рис. 1 – 4. Геомагнитная и солнечная активности характеризуются данными, приведенными в таблице. В статье используется киевское время. Солнечная активность в период с 15 по 22 сентября 2017 г. была низкой ($W= 11 - 22$); 15 и 16 сентября наблюдались соответственно магнитная буря ($K_p= 6$) и слабая магнитная буря ($K_p = 5$); 17 и 18 сентября магнитное поле было возмущенным ($K_p = 4$). В остальные дни исследований имели место лишь слабые возмущения ($K_p = 0 - 2$). Наибольший поток протонов солнечного ветра с энергией более 10 МэВ с интенсивностью $2.3 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2} \text{ стер}^{-1}$ зарегистрирован лишь 15 сентября, в остальные дни он был в 4 – 13 раз меньше. Во все дни измерений на суточных зависимостях $h_oF2(t)$ выявлены ПИВ с относительной амплитудой $A_d = 0.015 - 0.14$ колебаний h_oF2 .

Таблица 1 – Геомагнитная и солнечная активности с 15 по 22 сентября 2017 г.

Сентябрь 2017 г.	K_p -индекс	W	Средние за сутки потоки протонов с энергией больше 10 МэВ, $\text{см}^{-2} \text{ стер}^{-1}$
15	4+ 6- 4- 4+ 3 4 3+ 5+	12	$2.3 \cdot 10^5$
16	5- 5 5+ 3+ 3+ 4 4 3	13	$6.4 \cdot 10^4$
17	3 3 3+ 2 2+ 4- 4 2+	14	$3.1 \cdot 10^4$
18	1+ 4+ 4- 4 4 3- 3- 3-	13	$2.5 \cdot 10^4$
19	3+ 2+ 2- 1 2- 1+ 2 3-	11	$2.4 \cdot 10^4$
20	2+ 3 3+ 2 2 2 1 2	21	$1.8 \cdot 10^4$
21	1- 1- 1+ 2+ 1+ 2- 0+ 1+	22	$1.7 \cdot 10^4$
22	2- 1+ 1 1 0+ 1 1 2+	21	$1.9 \cdot 10^4$

На рис. 1 приведен пример временного цуга ПИВ, наблюдаемый по данным $h_oF2(t)$ для 22 сентября 2017 г. в период $t = 00:00 - 14:00$. Сплошными и штриховыми вертикальными стрелками указаны соответственно максимумы и минимумы цуга, использованные для определения временной зависимости $\tau(t)$. При этом учитывались лишь наибольшие экстремумы, локальные экстремумы цуга меньших амплитуд игнорировались. Полагаем, что не учитываемые нами экстремумы порождены суперпозицией фоновых возмущений h_oF2 с цугом ПИВ и перестройкой профиля высотного распределения $N(h)$ с началом восхода Солнца на ионосферных высотах. На рисунке момент восхода Солнца на поверхности земли отмечен штриховым вертикальным отрезком прямой.

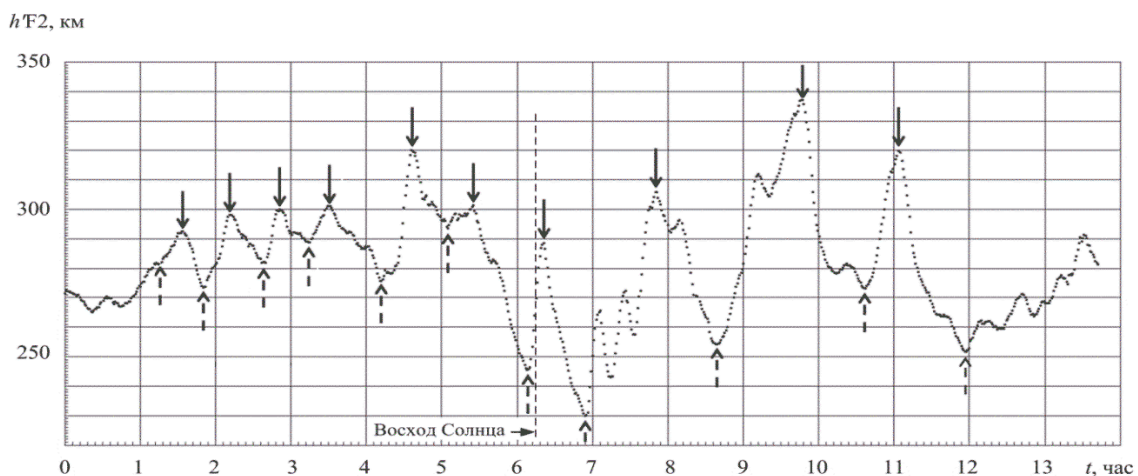


Рис. 1. Временной цуг ПИВ, наблюдавшийся 22 сентября 2017 г. на зависимости $h'F2(t)$.

На рис. 2 приведена зависимость $\tau(t)$ (кружки) и её линейная регрессия для измерений, выполненных 22 сентября 2017 г. Тангенс b угла наклона регрессии равен 0.06. Здесь сплошными

кружками-маркерами приведены значения τ , их время наблюдения полагается равным середине полупериода. За 11 часов наблюдения цуга полупериод увеличился в 3.1 раза: от 0.29 до 0.9 ч.

Коэффициент корреляции R данных зависимости $\tau(t)$ относительно линейной регрессии оказался равным 0.43. Большой разброс данных относительно линейной регрессии, видимо, обусловлен искажениями исследуемого цуга, обусловленными суперпозицией цугов ПИВ доминантной и уменьшенной амплитуд.

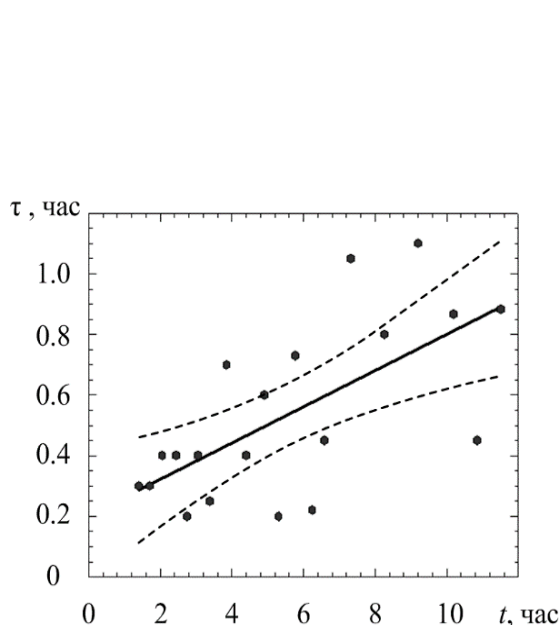


Рис. 2. Временная зависимость временного полупериода ПИВ и её линейная регрессия для 22 сентября 2017 г.: $b = 0.06$, $R = 0.43$, 95% доверительные интервалы указаны штриховыми линиями.

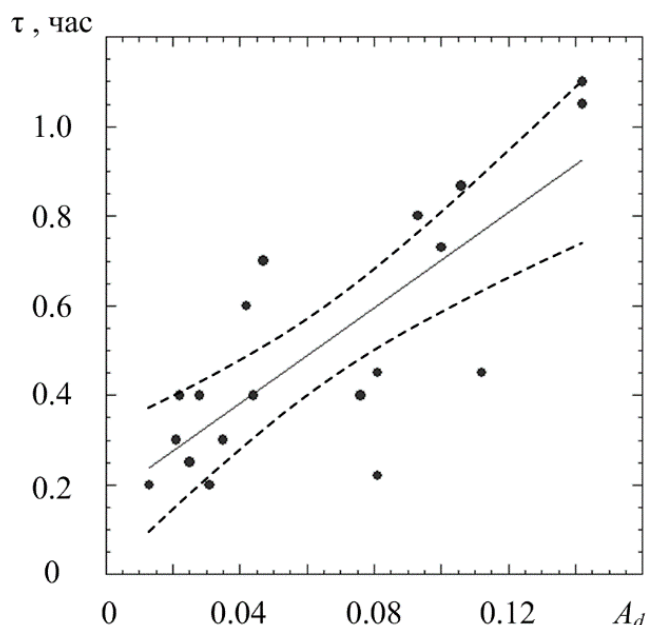


Рис. 3. Зависимость временного полупериода от нормированной амплитуды ПИВ и её линейная регрессия для 22 сентября 2017 г.: $b = 5.32$, $R = 0.65$, 95% доверительные интервалы указаны штриховыми линиями.

На рис. 3 для экспериментов, проведенных 22 сентября 2017 г, показана зависимость $\tau(A_d)$, коэффициент корреляции её линейной регрессии $R = 0.62$, $b = 5.32$. Зависимость $\tau(A_d)$ для 21.09.2017 имеет коэффициент корреляции её линейной регрессии равный $R = 0.78$, $b = 8.46$. Уточнённые нами линейные зависимости длительности полупериода ПИВ от его амплитуды после проверки по массивам данных, полученным при всех характерных гелиогеофизических условиях, будут использоваться для построения модели ПИВ.

На рис. 4 сопоставлены временные зависимости $f_oF2(t)$ и $h_o'F2(t)$, полученные 22 сентября 2017 г. Здесь близкие по времени наблюдения экстремумы упомянутых зависимостей соединены отрезками прямых: максимум на зависимости $h_o'F2(t)$ соединён с минимумом на зависимости $f_oF2(t)$ (штриховая линия) и наоборот – минимум в $h_o'F2(t)$ соединён с максимумом в $f_oF2(t)$ (сплошная линия). Как видно из рисунка, в подавляющем большинстве случаев минимумы и максимумы $f_oF2(t)$ имеют небольшую временную задержку появления в $\Delta t = 4 - 15$ мин относительно соответственно максимумов и минимумов $h_o'F2(t)$. Во время, близкое к восходу Солнца, значение Δt увеличивается до 30 мин.

Во время магнитных бурь регистрировался хорошо известный эффект (см., например, [12, 13]), заключающийся в том, что при понижении f_oF2 повышались значения $h_o'F2$. Эти результаты получены по ионограммам с часовой дискретностью. Поэтому фаза колебаний, связанная с повышением f_oF2 и понижением $h_o'F2$, видимо, была пропущена. Мы полагаем, что наши результаты не противоречат ранее обнаруженному эффекту, а детализируют его на основе измерений, выполненных с временной дискретностью, уменьшенной в 60 раз. Этот результат после тщательной проверки по суточным массивам $f_oF2(t)$ и $h_o'F2(t)$, зарегистрированным при характерных гелиогеофизических условиях, планируется использовать для развития модели ПИВ.

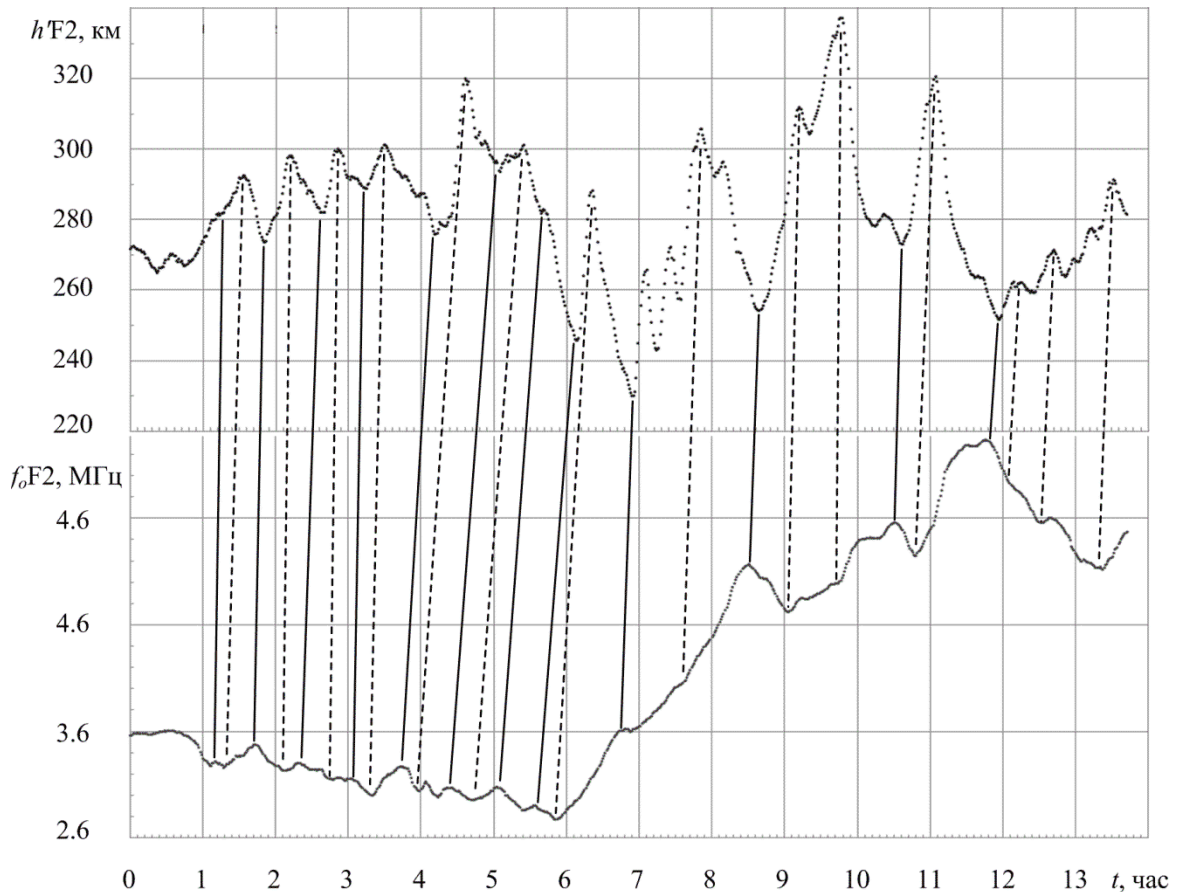


Рис. 4. Взаимосвязь максимумов $h_o'F2(t)$ с минимумами $f_oF2(t)$ и наоборот.

ВЫВОДЫ

1. По данным цифрового ионозонда в возмущённых условиях получены значения относительных амплитуд возмущений $h_o'F2$, равные 0.015 – 0.14.
2. По полусуточной зависимости $h_o'F2(t)$ подтверждается существование возрастающей зависимости относительной амплитуды ПИВ от длительности временного полупериода.
3. В близкие интервалы наблюдения на временных суточных зависимостях $h_o'F2(t)$ и $f_oF2(t)$ максимум на зависимости $h_o'F2(t)$ соответствует минимуму на зависимости $f_oF2(t)$ и наоборот минимум в $h_o'F2(t)$ соответствует максимуму в $f_oF2(t)$. Наблюдается задержка в 4 – 15 мин появления минимумов и максимумов в $f_oF2(t)$ относительно соответственно максимумов и минимумов в $h_o'F2(t)$.
4. Полученные зависимости параметров ПИВ после тщательной проверки их достоверности при характерных гелиогеофизических условиях планируется использовать для дальнейшего развития модели ПИВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Panasenko S. V., Goncharenko L. P., Erickson P. J., Aksonova K. D., Domnin I. F. Traveling ionospheric disturbances observed by Kharkiv and Millstone Hill incoherent scatter radars near vernal equinox and summer solstice // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. – 2018. – 172. – P. 10 – 23.
2. Nicolls M. J., Vadas S. L., Aponte N., Sulzer M. P. Horizontal parameters of daytime thermospheric gravity waves and E region neutral winds over Puerto Rico // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2014. – 119(1). – P. 575 – 600. – DOI: 10.1002/2013JA018988.
3. Черногор Л. Ф., Барабаш В. В. Волновые возмущения концентрации электронов в слое F2 ионосферы: суточно-сезонные вариации в период спада солнечной активности. // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2017. – 22, № 3. – С. 212 – 221.
4. Row R. V. Acoustic-gravity waves in the upper atmosphere due to a nuclear detonation and an earthquake // *J. Geophys. Res.* – 1967. – 72 (5). – P. 1599–1610.
5. Liu C. H., and Yeh K. C. Exciting of Acoustic-Gravity Waves in an Isothermal Atmosphere // *Tellus*. – 1971. – 23. – P. 150–163.
6. Francis S. H. A Theory of Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbances // *J. Geophys. Res.* – 1974. – 79, 34. – P. 5245–5260.

7. Roberts D. H., Klobuchar J. A., Fougere P. F., Hendrickson D. H. A large-amplitude traveling ionospheric disturbance produced by the May 18, 1980, explosion of Mount St. Helens. // J. Geophys. Res. – 1982, – 87 (A8). – P. 6291 – 6301.
8. Hocke K., Schlegel K. A review of atmospheric gravity waves and traveling ionospheric disturbances: 1982–1995 // Ann. Geophys. – 1996. – 14. – P. 917 – 940.
9. Hunsucker R. D. Atmospheric Gravity Waves Generated in the High-Latitude Ionosphere: A Review. // Revs Geophys. and Space Phys. –1982. – 20 (2). – P. 293–315.
10. Fedorenko Y. P. Model of traveling ionospheric disturbances / Y. P. Fedorenko, O. F. Tyrnov, V. N. Fedorenko, V. L. Dorohov // J. Space Weather Space Clim. – 2013. – 3, A30. – P. 1 – 28. – DOI: 10.1051/swsc/2013052.
11. Черногор Л. Ф. Радиофизическая обсерватория Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина – средство для мониторинга ионосферы в космических экспериментах / Л. Ф. Черногор, К. П. Гармаш, В. А. Поднос, О. Ф. Тырнов // Космический проект «Ионосат-микро». – 2013. – Киев: «Академперіодика». – 218 с. – С. 160 – 182.
12. Шашунькина В. М. Результаты исследования ионосферного эффекта внезапного начала магнитной бури // Ионосферные исслед. – 1972. – № 20. – С. 154–165.
13. Тырнов О. Ф., Федоренко Ю. П., Дорохов В. Л. Пространственно-временная динамика перемещающихся ионосферных возмущений // Космічна наука і технологія. – 2016. –22, № 5. – С. 3 – 70.