

УДК 550.388.2, 551.510.535, 537.874.4

С. В. ПАНАСЕНКО

ВЫЯВЛЕНИЕ ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ В ВАРИАЦИЯХ МОЩНОСТИ НЕКОГЕРЕНТНО РАССЕЯННОГО СИГНАЛА

Оценено влияние относительных амплитуд и начальных фаз гармонических вариаций концентрации электронов, температур электронов и ионов на относительные амплитуды мощности некогерентно рассеянного сигнала. Проведено математическое моделирование и рассчитаны относительные систематические погрешности оценки относительной амплитуды концентрации электронов. Продемонстрировано, что для приведенных в литературе соотношений между ионосферными параметрами максимальная относительная систематическая погрешность определения относительных амплитуд квазигармонических вариаций концентрации электронов обычно не превышает 0.4 – 0.5.

Ключевые слова: некогерентное рассеяние, квазигармонические вариации, волновые возмущения, математическое моделирование, систематическая погрешность.

Введение. Метод некогерентного рассеяния (НР) радиоволн является одним из наиболее информативных радиофизических методов. Он позволяет определять высотно-временные зависимости не только самих ионосферных параметров, таких как концентрация электронов (N_e), температура электронов (T_e) и ионов (T_i), скорость движения плазмы и ее ионный состав (т. е. их регулярные вариации), но и параметров волновых процессов в ионосферной плазме [1–3].

К таким процессам относятся акустико-гравитационные волны (АГВ), играющие важную роль при взаимодействии различных атмосферных областей. Они не только эффективно переносят импульс и энергию, но и служат индикатором мощных природных и искусственных процессов, происходящих на Земле и под ее поверхностью, в атмосфере и геокосмосе. АГВ изучаются уже на протяжении многих десятилетий с помощью как космических, так и наземных средств. Как известно (см., например, [4, 5]) проявлениями АГВ в ионосфере являются перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ), приводящие к квазипериодическим вариациям ионосферных параметров (N_e , T_e , T_i и др.). АГВ часто выявляют по наличию ПИВ, а параметры АГВ при этом рассчитываются через оцененные параметры ионосферных возмущений [6].

Для выявления волновых процессов в ионосферной плазме по данным харьковского радара НР обычно анализируются квазипериодические вариации относительной мощности НР сигнала (см., например, [3, 7–10]). При этом считается, что их относительная амплитуда приблизительно равна относительной амплитуде концентрации электронов на заданной высоте, а влияние квазипериодических вариаций температур электронов и ионов пренебрежимо мало.

Целью данной работы является оценка систематической погрешности, возникающей при нахождении относительной амплитуды волновых возмущений концентрации электронов по квазигармоническим вариациям мощности НР сигнала для различных ионосферных условий.

Результаты теоретических исследований. Как известно (см., например, [1]), мощность принимаемого НР сигнала P определяется из следующего соотношения:

$$P = C \frac{N_e}{h^2 (1 + T_e / T_i)}, \quad (1)$$

где C – константа радара;

h – высота зондируемой ионосферной области.

Формула (1) справедлива при условии $4\pi D_e \ll \lambda$, где D_e – дебаевский радиус экранирования для электронов, λ – длина радиоволны. Это неравенство выполняется для харьковского радара НР.

При дальнейшем анализе исследуемую величину $X = P, N_e, T_e, T_i$ будем представлять в виде:

$$X = \bar{X} \left(1 + \frac{\Delta X}{\bar{X}} \right) = \bar{X} (1 + \delta X), \quad (2)$$

где \bar{X} – регулярная составляющая или тренд;

ΔX – абсолютное отклонение от \bar{X} ;

$\delta X = \Delta X / \bar{X}$ – относительное отклонение.

В случае, если временная зависимость δX носит квазигармонический характер, ее можно представить в виде

$$\delta X = \delta_X \cos(\Omega t + \varphi_X), \quad (3)$$

где t – время;

Ω – циклическая частота колебания;

δ_X и φ_X – относительная амплитуда и начальная фаза соответственно, которые в общем случае могут также зависеть от t .

Подставляя выражения в виде (2) для ионосферных параметров в формулу (1), получим следующее соотношение

$$P = C \frac{\bar{N}_e (1 + \delta N_e)}{h^2 \left[1 + \frac{\bar{T}_e (1 + \delta T_e)}{\bar{T}_i (1 + \delta T_i)} \right]},$$

которое можно представить в следующем виде

$$P = C \frac{\bar{N}_e (1 - k_T)}{h^2} \frac{(1 + \delta N_e)(1 + \delta T_i)}{1 + k_T \delta T_e + (1 - k_T) \delta T_i}, \quad (4)$$

где $k_T = \bar{T}_e / (\bar{T}_e + \bar{T}_i)$.

Из выражения (4) видно, что в общем случае при волновых возмущениях ионосферных параметров временные вариации P не будут иметь квазигармонический характер за счет наличия

нелинейной зависимости в выражении (1). Однако результаты многочисленных экспериментальных исследований свидетельствуют о том, что относительные амплитуды волновых возмущений ионосферных параметров обычно составляют единицы процентов и не превышают нескольких десятков процентов (см., например, [5, 6, 11]). Поэтому сначала рассмотрим такие колебания, для которых $\delta_x \ll 1$. Чтобы избавиться от знаменателя второй дроби в формуле (4), применим разложение в ряд Тейлора, ограничившись только первыми двумя слагаемыми.

$$P = C \frac{\bar{N}_e(1-k_T)}{h^2} (1 + \delta N_e)(1 + \delta T_i) [1 - k_T \delta T_e - (1 - k_T) \delta T_i].$$

Представим P в виде (2) и, выполняя дальнейшее умножение, оставим только линейные члены в правой части предыдущего равенства. После небольших преобразований получим окончательное соотношение

$$\bar{P}(1 + \delta P) = C \frac{\bar{N}_e(1-k_T)}{h^2} [1 + \delta N_e + k_T(\delta T_i - \delta T_e)],$$

откуда следует, что

$$\bar{P} = C \frac{\bar{N}_e(1-k_T)}{h^2}, \quad (5)$$

$$\delta P = \delta N_e + k_T(\delta T_i - \delta T_e). \quad (6)$$

Из выражения (6) видно, что равенство $\delta P = \delta N_e$ выполняется только в том случае, если $\delta T_i = \delta T_e$, что с учетом выражений (3) соответствует равенству их относительных амплитуд ($\delta_{T_i} = \delta_{T_e}$) и начальных фаз колебаний ($\varphi_{T_i} = \varphi_{T_e}$). Тогда $\delta_P = \delta_{N_e}$ и $\varphi_P = \varphi_{N_e}$.

Подставляя в (6) выражения (3), можно получить следующую формулу для δ_P

$$\delta_P = \sqrt{\delta_{N_e}^2 + k_T^2 \delta^2 - 2k_T \delta_{N_e} \delta \cos(\varphi_N - \varphi)}, \quad (7)$$

где

$$\delta = \sqrt{\delta_{T_i}^2 + \delta_{T_e}^2 - 2\delta_{T_i} \delta_{T_e} \cos(\varphi_{T_i} - \varphi_{T_e})},$$

$$\varphi = \arctg \left(\frac{\delta_{T_i} \sin \varphi_{T_i} - \delta_{T_e} \sin \varphi_{T_e}}{\delta_{T_i} \cos \varphi_{T_i} - \delta_{T_e} \cos \varphi_{T_e}} \right).$$

Из выражения (7) следует, что равенство $\delta_P = \delta_{N_e}$ может также выполняться, если

$$\delta_{N_e} = \frac{k_T \delta}{2 \cos(\varphi_{N_e} - \varphi)}.$$

Относительную систематическую погрешность оценки δ_{N_e} будем определять следующим образом

$$\varepsilon = \frac{\delta_P - \delta_{N_e}}{\delta_{N_e}},$$

что с учетом (6) можно записать в виде

$$\varepsilon = \sqrt{1 + k_T^2 \left(\frac{\delta}{\delta_{N_e}} \right)^2 - 2k_T \left(\frac{\delta}{\delta_{N_e}} \right) \cos(\varphi_{N_e} - \varphi)} - 1. \quad (8)$$

Из (8) видно, что в зависимости от соотношений между относительными амплитудами и начальными фазами квазигармонических вариаций ионосферных параметров будет иметь место как переоценка ($\varepsilon > 0$), так и недооценка ($\varepsilon < 0$) значения δ_{N_e} .

Если условие $\delta_x \ll 1$ не выполняется, то, как упоминалось выше, вариации δP уже не будут квазигармоническими. В этом случае разложим правую часть выражения (4) в ряд Фурье и найдем относительную амплитуду гармонической составляющей, соответствующей циклической частоте Ω из следующего соотношения:

$$\delta_P^{Fourier} = \frac{\Delta_P^{Fourier}}{\bar{P}^{Fourier}},$$

где $\Delta_P^{Fourier}$ – амплитуда гармоники с относительной частотой Ω ;

$\bar{P}^{Fourier}$ – постоянная составляющая мощности НР сигнала.

Тогда выражение для ε будет иметь вид

$$\varepsilon = \frac{\delta_P^{Fourier} - \delta_{N_e}}{\delta_{N_e}}. \quad (9)$$

Можно показать, что при $\delta_x \ll 1$ выполняются равенства $\delta_P^{Fourier} = \delta_P$, $\bar{P}^{Fourier} = \bar{P}$, и формула (9) переходит в соотношение (8).

Результаты компьютерного моделирования.

Для нахождения величины ε при различных значениях относительных амплитуд и начальных фаз колебаний ионосферных параметров было проведено компьютерное моделирование.

Исходя из выражений (7) – (9), можно показать, что величина ε зависит от семи переменных, а именно

$$\varepsilon = \varepsilon(k_T, \delta_{N_e}, \varphi_{N_e}, \delta_{T_e}, \varphi_{T_e}, \delta_{T_i}, \varphi_{T_i}). \quad (10)$$

Поскольку значение φ_{N_e} всегда можно зафиксировать выбором начального времени наблюдения, здесь и далее будем считать, что $\varphi_{N_e} = 0$. Кроме того, будем анализировать не сами погрешности ε , а их максимальные абсолютные значения $\varepsilon_{\max} = |\varepsilon|_{\max}$.

Зависимость ε_{\max} от δ_{T_e} и δ_{T_i} при различных значениях k_T и δ_{N_e} представлена на рис. 1. При этом каждое значение ε_{\max} является глобальным максимумом функции $|\varepsilon(\varphi_{T_e}, \varphi_{T_i})|$ при фиксированных значениях остальных параметров.

Из рис. 1 видно, что, как и следовало ожидать, величина ε_{\max} существенно возрастает с увеличением δ_{T_e} и δ_{T_i} . В случае сильных вариаций концентрации электронов при $\delta_{T_e}, \delta_{T_i} > 0.5-0.7$ имеет место ярко выраженная зависимость значений ε_{\max} от соотношения между относительными амплитудами температур электронов и ионов (см. рис. 1, правый столбец).

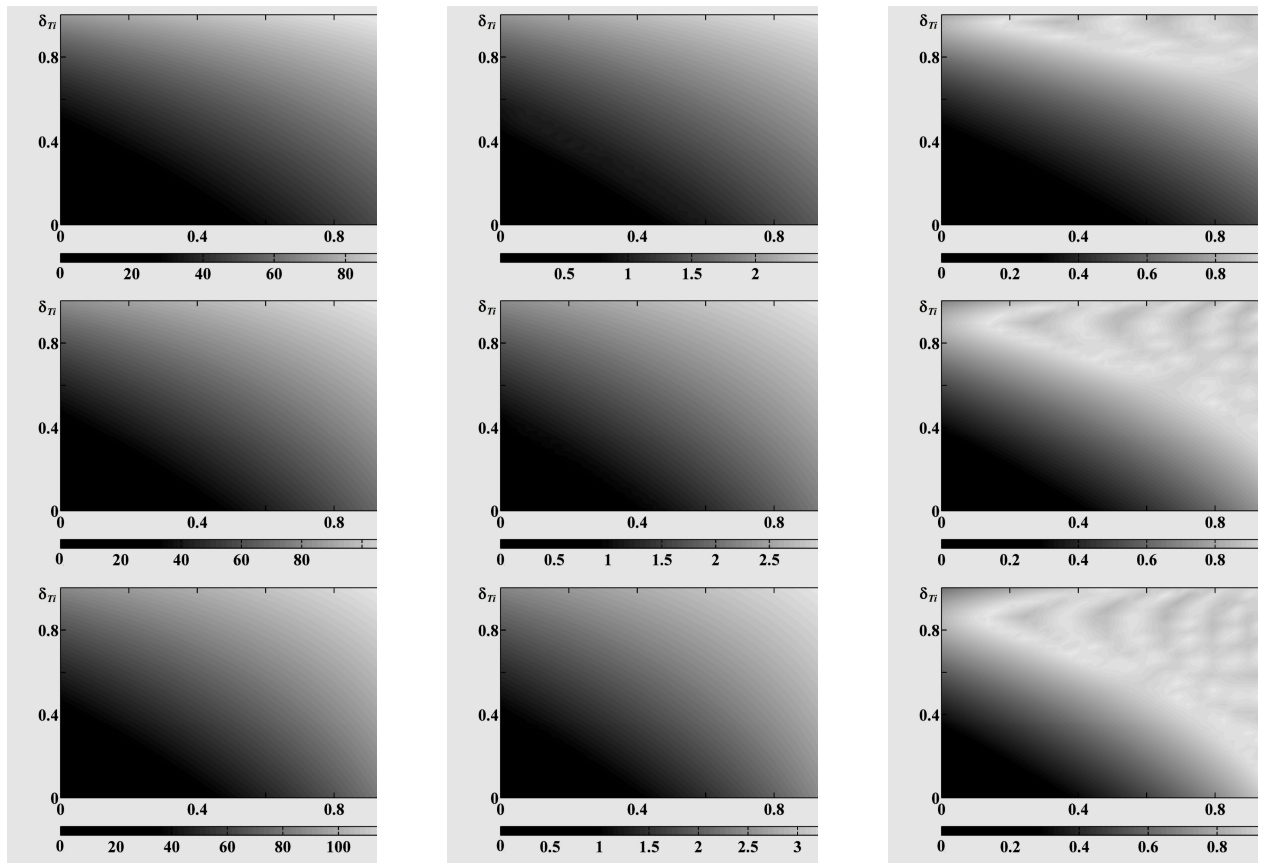


Рис. 1 – Зависимость максимальной систематической относительной погрешности ε_{\max} от относительных амплитуд колебаний температур электронов и ионов при $k_T = 0.5$ (верхняя панель), $k_T = 0.67$ (средняя панель) и $k_T = 0.75$ (нижняя панель) для слабых ($\delta_{Ne} = 0.01$, левый столбец), средних ($\delta_{Ne} = 0.3$, средний столбец) и сильных ($\delta_{Ne} = 0.75$, правый столбец) квазигармонических вариаций концентрации электронов

Следует отметить существенное увеличение исследуемой погрешности с уменьшением δ_{Ne} и ее незначительный рост с увеличением коэффициента k_T .

В табл. 1 представлены глобальные максимумы функции $\varepsilon_{\max}(\delta_{Te}, \delta_{Ti})$ для ряда значений параметров k_T и δ_{Ne} . Из этой таблицы видно, что ε_{\max} может достигать огромных значений (порядка 1–100 или 10^2 – 10^4 %) при определенных соотношениях между ионосферными параметрами. При больших значениях относительной амплитуды концентрации электронов ($\delta_{Ne} \geq 0.75$) величина ε_{\max} перестает зависеть от относительных амплитуд колебаний ионосферных параметров, а ее значение становится равным 1 (см. табл. 1).

Таблица 1 – Значения ε_{\max} при различных соотношениях между k_T и δ_{Ne}

$k_T \backslash \delta_{Ne}$	0.01	0.1	0.3	0.5	0.75	1
0.5	99.42	9.47	2.77	1.41	1.00	0.97
0.67	116.50	11.10	3.26	1.67	1.00	1.00
0.75	126.09	12.02	3.53	1.82	1.00	1.00

Обсуждение результатов. Оценка величины систематической погрешности позволяет получить ответ на вопрос о возможности и целесообразности анализа временных вариаций мощности НР сигнала

для выявления колебаний концентрации электронов и определения значений их относительных амплитуд. Важным и информативным методом ее исследования является компьютерное моделирование, позволяющее проанализировать зависимость этой погрешности от ионосферных параметров и определить диапазон изменения ее значений. При этом необходимо учитывать, что не все соотношения между параметрами, входящими в (10), могут иметь место в экспериментах.

Например, при выборе значений k_T принимался во внимание тот факт, что отношение температур T_e / T_i для реальных ионосферных условий обычно лежит в пределах 1 – 3. Поэтому расчеты проведены для коэффициентов $k_T = 0.5, 0.67$ и 0.75 , которые отвечают отношениям T_e / T_i , равным 1, 2 и 3 соответственно.

Из рис. 1 видно, что наибольшие значения ε_{\max} достигаются, когда $\delta_{Ne} \ll \delta_{Te}, \delta_{Ti}$. Такие неравенства практически никогда не выполняются для ионосферы, поскольку разогрев (охлаждение) электронов и ионов всегда приводит к расширению (сжатию) ионосферной плазмы, что вызывает существенные вариации концентрации электронов.

Результаты экспериментальных исследований параметров квазигармонических вариаций ионосферных параметров представлены в работах [5, 6, 11]. На рис. 2 приведен пример высотных

зависимостей модельных и экспериментальных значений δ_{Ne} , δ_{Te} , и δ_{Ti} , полученных в работе [6]. Из этого рисунка видно, что значения $\delta_{Ne} = 0.01-0.2$, $\delta_{Te} = 0.01-0.04$, $\delta_{Ti} = 0.01-0.02$. Подобные значения

относительных амплитуд ионосферных параметров были получены авторами [6] и для других интервалов наблюдений.

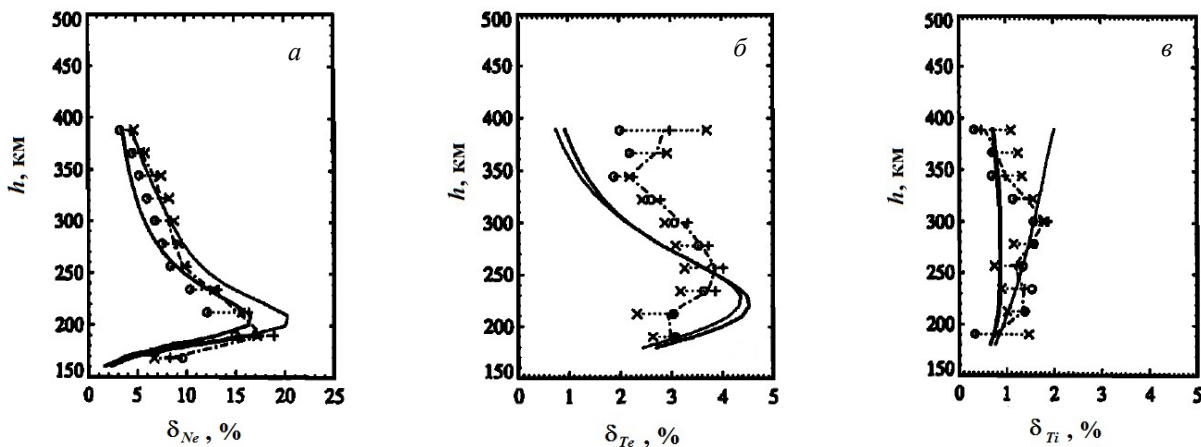


Рис. 2 – Высотные зависимости модельных (сплошные линии) и экспериментальных (штрихпунктирные линии) зависимостей, полученные для 17 ноября 1987 г. [6]: а – δ_{Ne} , б – δ_{Te} , в – δ_{Ti}

Что касается начальных фаз колебаний, то, как показано в работах [5, 11], их средние значения составляют 185° (3.23 рад) и 130° (2.27 рад), если считать, как и раньше, что $\varphi_{Ne} = 0$. Таким образом, квазигармонические вариации концентрации электронов с одной стороны и температур электронов и ионов – с другой происходят почти противофазно.

В табл. 2 приведены результаты расчетов ϵ_{max} для ряда наблюдаемых значений δ_{Ne} , δ_{Te} , и δ_{Ti} . При этом, так же, как и на рис. 1, были выбраны такие значения φ_{Te} и φ_{Ti} , для которых имел место глобальный максимум абсолютного значения относительной систематической погрешности. Как видно из этой таблицы, максимальная систематическая погрешность обычно не превышает 0.4–0.5, а при увеличении δ_{Ne} она существенно уменьшается до 0.01–0.1.

Таким образом, для большинства наблюдений можно в качестве оценки δ_{Ne} с приемлемой относительной систематической погрешностью брать значения δ_r . Однако, поскольку соотношения между ионосферными параметрами в каждом конкретном эксперименте заранее не известны, величина ϵ в ряде случаев может принимать значения существенно большие, чем приведенные в табл. 2. Поэтому такую оценку целесообразно использовать лишь тогда, когда случайные погрешности определения δ_{Te} , и δ_{Ti} достаточно велики (низкие значения отношения сигнал / шум), либо температуры электронов и ионов не могут быть оценены из экспериментальных данных (использование режима зондирования “коротким” импульсом для улучшения разрешения по высоте).

Выводы. Проанализирована степень влияния волновых возмущений концентрации электронов, температуры электронов и ионов на уровень квазигармонических вариаций мощности НР сигнала при различных соотношениях между ионосферными параметрами. Проведены теоретическое исследование и компьютерное моделирование, позволившие

оценить величину относительной систематической погрешности определения относительной амплитуды колебаний концентрации электронов. Показано, что ее максимальное значение обычно не превышает 0.4–0.5, а при увеличении δ_{Ne} уменьшается до 0.01–0.1. Приведены случаи, когда использование такой оценки является целесообразным.

Таблица 2 – Значения ϵ_{max} для наблюдаемых значений δ_{Ne} , δ_{Te} , и δ_{Ti} . Расчеты приведены для $k_T = 0.67$

δ_{Ne}	δ_{Te}	δ_{Ti}	φ_{Te}	φ_{Ti}	ϵ_{max}
0.01	0.01	0.01	3.23	2.27	0.36
0.04					0.07
0.07					0.04
0.1					0.03
0.2					0.01
0.04	0.04	0.02	3.23	2.27	0.49
0.07					0.27
0.1					0.19
0.2					0.09

Список литературы: 1. Evans J. V. Theory and practice of ionosphere study by Thomson scatter radar / J. V. Evans // Proc. IEEE. – 1969. – V. 57, issue 4. – P. 496–530. 2. Брюнелли Б. Е. Метод некогерентного рассеяния радиоволн / Б. Е. Брюнелли, М. И. Кочкин, И. Н. Пресняков, Е. Д. Терещенко, В. Д. Терещенко – Л.: Наука, 1979. – 188 с. 3. Бурмака В. П. Результаты исследования волновых возмущений в ионосфере методом некогерентного рассеяния / В. П. Бурмака, В. И. Таран, Л. Ф. Черногор // Успехи современной радиоэлектроники. – 2005. – № 3. – С. 4–35. 4. Hines C. O. Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights / C. O. Hines // Can. J. Phys. – 1960. – V. 38, No 11. – P. 1441–1481 5. Hocke K. A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982–1995 / K. Hocke, K. Schlegel // Ann. Geophys. – 1996. – V. 14, No 9. – P. 917–940. 6. Kirchengast G. Gravity waves determined by modeling of traveling ionospheric disturbances in incoherent-scatter radar measurements / G. Kirchengast, K. Hocke, K. Schlegel // Radio Sci. – 1995. – V. 30, No 5. – P. 1551–1567. 7. Burmaka V. P. Wave Disturbances in the Ionosphere during a Lasting Solar Activity Minimum / V. P. Burmaka, L. F. Chernogor // Geomagn.

Aeron. – 2012. – V. 52, No. 2. – Pp. 183 – 196. **8.** *Burmaka V. P.* Solar eclipse of August 1, 2008, above Kharkov: 2. Observation results of wave disturbances in the ionosphere / *V. P. Burmaka, L. F. Chernogor* // *Geomagn. Aeron.* – 2013. – V. 53, No. 4. – Pp. 479–491. **9.** *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* // *Radiophys. Quant. El.* – 2012. – V. 55, No 4. – Pp. 253–265. **10.** *Панасенко С. В.* Обнаружение перемещающихся ионосферных возмущений в квазипериодических вариациях мощности некогерентно рассеянного сигнала / *С. В. Панасенко, А. О. Мамедов* // *Вісник НТУ «ХПІ»*. Сер.: Радіофізика та іоносфера – 2013. – № 33 (1066). – С. 12–18. **11.** *Hocke K.* Phases and amplitudes of TIDs in the high latitude F-region observed by EISCAT / *K. Hocke, K. Schlegel, G. Kirchengast* // *J. Atm. Terr. Phys.* – 1996. – V. 58, No 1 – 4. – P. 245–255.

Bibliography (transliterated): **1.** Evans, J. V. “Theory and practice of ionosphere study by Thomson scatter radar.” *Proc. IEEE* 57.4 (1969): 496–530. Print. **2.** Brjunelli, B. E., et al. *Metod nekogerentnogo rassejanija radiovoln*. Leningrad: Nauka, 1979. Print. **3.** *Burmaka, V. P., V. I. Taran, and L. F. Chernogor.* “Rezultaty issledovanija volnovyh vozmushhenij v ionosfere metodom nekogerentnogo rassejanija.” *Uspehi sovremennoj radioelektroniki* 3 (2005): 4–35. Print. **4.** Hines, C. O. “Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights.”

Can. J. Phys. 38.11 (1960): 1441–1481. Print. **5.** Hocke, K., and K. Schlegel “A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982 – 1995.” *Ann. Geophys.* 14.9 (1996): 917–940. **6.** Kirchengast, G., K. Hocke, and K. Schlegel. “Gravity waves determined by modeling of traveling ionospheric disturbances in incoherent-scatter radar measurements.” *Radio Sci.* 30.5 (1995): 1551–1567. Print. **7.** *Burmaka, V. P., and L. F. Chernogor.* “Wave Disturbances in the Ionosphere during a Lasting Solar Activity Minimum.” *Geomagn. Aeron.* 52.2 (2012): 183–196. Print. **8.** *Burmaka, V. P., and L. F. Chernogor.* “Solar eclipse of August 1, 2008, above Kharkov: 2. Observation results of wave disturbances in the ionosphere.” *Geomagn. Aeron.* 53.4 (2013): 479–491. Print. **9.** *Domnin, I. F., et al.* “Results of Radiophysical Study of Wave Disturbances in the Ionospheric Plasma During Its Heating by High-Power HF Radio Transmission of “Sura” facility.” *Radiophys. Quant. El.* 55.4 (2012): 253–265. Print. **10.** *Panasenko, S. V., and A. O. Mamedov.* “Obnaruzhenie peremeshhajushhhsja ionosfernyh vozmushhenij v kvaziperiodicheskijh variacijah moshhnosti nekogerentno rassejannogo signala.” *Visnyk NTU “KhPI”*. Ser.: *Radiofizyka ta ionosfera* 33 (2013): 12–18. Print. **11.** *Hocke, K., K. Schlegel, and G. Kirchengast.* “Phases and amplitudes of TIDs in the high latitude F-region observed by EISCAT.” *J. Atm. Terr. Phys.* 58.1–4 (1996): 245–255. Print.

Поступила (received) 24.07.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Панасенко Сергій Валентинович – кандидат фізико-математичних наук, завідувач відділу Інституту іоносфери НАН і МОН України, м. Харків; тел.: (057) 706-22-87; e-mail: sergii.v.panasenko@gmail.com.

Панасенко Сергей Валентинович – кандидат физико-математических наук, заведующий отделом Института ионосферы НАН и МОН Украины, г. Харьков; тел.: (057) 706-22-87; e-mail: sergii.v.panasenko@gmail.com.

Panasenko Sergii Valentynovich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of Department of Institute of ionosphere, Kharkiv; phone: (057) 706-22-87; e-mail: sergii.v.panasenko@gmail.com.