

УДК 550.388.2, 551.510.535

Е. Д. АКСЁНОВА, С. В. ПАНАСЕНКО

СЕЗОННЫЕ ВАРИАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ИОНОСФЕРЕ ПО ДАННЫМ ХАРЬКОВСКОГО РАДАРА НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ

Проанализированы временные вариации относительных изменений мощности, температуры электронов и ионов, полученных методом некогерентного рассеяния, для ряда суточных наблюдений в магнитоспокойные дни вблизи характерных геофизических периодов (равноденствия и солнцестояния). Показано, что волновые процессы присутствовали во всех проанализированных суточных зависимостях. Их периоды, длительности, а также диапазоны высот, где они наблюдались, были близки между собой. Продemonстрировано, что периоды среднемасштабных перемещающихся волновых возмущений составляли 40 – 80 мин, а продолжительности 2 – 5 периодов. Относительные амплитуды волновых возмущений в мощности менялись в пределах 0,1 – 0,3, а в температурах электронов и ионов они равнялись 0,03 – 0,1.

Ключевые слова: некогерентное рассеяние, перемещающиеся ионосферные возмущения, слабая геомагнитная активность, сезонные вариации, периоды, длительности и амплитуды волн.

Проаналізовано часові варіації відносних змін потужності, температури електронів та іонів, отримані методом некогерентного розсіяння, для ряду добових вимірів в магнітоспокійні дні поблизу характерних геофізичних періодів (рівнодення і сонцестояння). Показано, що хвильові процеси були присутні у всіх проаналізованих добових залежностях. Їх періоди, тривалість, а також діапазони висот, де вони спостерігалися, були близькі між собою. Продemonстровано, що періоди середньомасштабних рухомих іоносферних збурень становили 40 – 80 хв, а тривалість 2 – 5 періодів. Відносні амплітуди хвильових варіацій в потужності змінювались в межах 0,1 – 0,3, а в температурах електронів та іонів вони рівнялись 0,03 - 0,1.

Ключові слова: некогерентного розсіювання, рухомі іоносферні збурення, слабка геомагнітна активність, сезонні варіації, періоди, тривалість та амплітуди хвиль.

We analyzed temporal variations in the relative power changes, electron and ion temperatures, obtained by incoherent scatter technique, for a number of daily observations in magnetically quiet days near the typical geophysical periods (equinoxes and solstices). It is shown that the wave processes occurred in all analyzed daily dependencies. Their periods, the duration and range of altitudes, where they observed were close to each other. It has been demonstrated that periods of medium scale traveling ionospheric disturbances were of 40 - 80 minutes, the durations were of 2 – 5 periods. The relative amplitudes in power variation were between 0.1 – 0.3, and for the electron and ion temperatures they were equal to 0.03 – 0.1.

Keywords: incoherent scattering, traveling ionospheric disturbances, weak geomagnetic activity, seasonal variations, periods, duration and amplitudes of the waves.

Введение. В ионосфере наблюдается широкий спектр неоднородностей, вызванных воздействиями естественных (солнечная, сейсмическая, метеорологическая активность) и искусственных (нагрев мощными радиоволнами) источников. Генерируемые этими источниками атмосферные волны распространяются до больших высот с нарастанием амплитуды и могут приводить в движение ионосферную плазму за счет соударений нейтральных и заряженных частиц. Акустико-гравитационные волны (АГВ) в ионосфере вызывают распространение перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) в F – области, а также различного типа плазменные неустойчивости. ПИВ – это особый тип волновых ионосферных возмущений, который характеризуется квазипериодическими вариациями параметров ионизированной компоненты и способностью распространяться на большие расстояния. Таким образом, АГВ невозможно обнаружить методом некогерентного рассеяния (НР), поэтому с использованием этого метода удается исследовать только их проявления на ионосферных высотах, которыми зачастую являются ПИВ. Поскольку мощность НР сигнала прямо пропорциональна концентрации электронов, появляется возможность анализа самого сигнала НР для получения характеристик ПИВ.

Интерес к АГВ/ПИВ обусловлен их сильным влиянием на распространение радиоволн различных диапазонов и тем, что они играют основную роль в

глобальном перераспределении энергии, получаемой атмосферой через магнитосферу от солнечного ветра. Метод НР дает возможность наиболее комплексного измерения и диагностики наземными средствами высотного распределения параметров ионосферной плазмы (концентрация электронов (N_e), температуры электронов (T_e) и ионов (T_i), скорость движения плазмы, ионный состав).

Несмотря на многолетние исследования ПИВ, многие вопросы их генерации и динамики все еще не получили должного объяснения.

Целью данной работы является выявление и анализ квазипериодических вариаций мощности НР сигнала и плазменных температур, вызванных прохождением ПИВ над Харьковом, в интервалы времени, близкие к весеннему и осеннему равноденствию, а также зимнему и летнему солнцестоянию в магнитоспокойные дни.

Методика обработки данных. Для нахождения параметров ПИВ использовались временные зависимости мощности НР сигнала, полученные с помощью харьковского радара НР. Данные сначала подвергались предварительной фильтрации с целью удаления следующих помех.

1. Резкий скачок уровня сигнала, который возникает при изменении усиления или выходе из строя одного из элементов прямо-передающей системы.

2. Внешние импульсные помехи, часто имеющие место во время грозы или связанные с приемом

сигналов близко расположенных мощных радиостанций. Проявляются в виде длительного (около 10 – 60 мин) увеличения мощности сигнала.

3. Когерентные отражения, связанные с отражением излученного сигнала от точечных целей – космических аппаратов или фрагментов космического мусора. Они представляют собой кратковременные (длительность меньше минуты) всплески уровня НР сигнала.

Для решения задачи фильтрации были разработаны алгоритмы, реализованные в компьютерной программе. Они позволяют скорректировать уровень сигнала и отфильтровать помехи на основе статистических методов анализа временных рядов [1].

При дальнейшем анализе определялись интервалы времени, при которых мощность НР сигнала испытывала квазипериодические вариации продолжительностью не менее двух периодов и в широком диапазоне высот. Для уточнения параметров этих возмущений применялась полосовая фильтрация с использованием цифрового фильтра.

Также была решена обратная задача НР для оценки температур электронов (T_e) и ионов (T_i) с использованием пакета программ UPRISE, где выполняется автоматизированная пороговая фильтрация данных с целью устранения когерентных помех [2]. Для получения плазменных температур необходимо многократно решать прямую задачу НР с использованием библиотек теоретических корреляционных функций, которые сравниваются с экспериментальной корреляционной функцией до нахождения наилучшего согласия.

Вдобавок было рассчитано время прохождения солнечного терминатора (СТ) на исследуемых ионосферных высотах. В ряде работ было показано, что движение СТ вызывает генерацию АГВ, неустойчивостей и флуктуаций в ионосферной плазме в широком диапазоне высот [3; 4].

Таким образом, для выявления и оценки параметров ПИВ, было проведено несколько этапов обработки данных.

1. Предварительная фильтрация данных (устранение когерентных отражений, импульсных помех и сбоев аппаратуры).

2. Устранение тренда и выявления вариаций мощности НР сигнала в диапазоне периодов 5 – 120 мин.

3. Расчет времени прохождения солнечного терминатора над Харьковом на исследуемых высотах.

4. Решение обратной задачи НР для оценки температур электронов и ионов с использованием пакета программ UPRISE.

5. Устранение тренда и выявления вариаций температур электронов и ионов в диапазоне периодов 5 – 120 мин.

6. Полосовая фильтрация вариаций мощности и плазменных температур в диапазоне периодов 40 – 80 мин.

7. Интерпретация полученных результатов.

Иначе говоря, для анализа экспериментальных данных, полученных методом НР, необходимо использование усовершенствованных пакетов программ, с помощью которых можно получить интересные нас параметры ионосферы.

Сведения о геомагнитной активности.

Поскольку объектом исследования являются среднемасштабные ПИВ, была проанализирована геомагнитная обстановка в дни наблюдений.

Среднемасштабные ПИВ имеют горизонтальную длину волны несколько сотен километров, периоды 15 – 80 мин и фазовую скорость 50 – 250 м/с. Они генерируются различными источниками в нижней атмосфере, связанными с метеорологическими процессами, движением СТ и др.

Индексы геомагнитной активности предназначены для описания вариаций магнитного поля Земли, вызванных нерегулярными источниками (воздействие потока солнечной плазмы (солнечного ветра) на магнитосферу Земли, изменениями внутри магнитосферы и взаимодействием магнитосферы и ионосферы). A_p -индекс определяется в единицах магнитного поля (нТл) и представляет среднее значение вариации магнитного поля, соответствующей данному K_p -индексу.

Планетарные K_p - и A_p -индексы были получены по запросу [5] из Центра Прогноза Погоды (Национальное управление океанических и атмосферных исследований).

В табл. 1 приведены значения A_p - и K_p -индексов, которые позволяют оценить состояние геомагнитной активности в дни наблюдений.

Таблица 1 – Сведения о магнитной активности

Дата	A_p - индекс	K_p - индекс
19.12.14	8	3 2 2 2 1 2 2 2
25.03.09	10	4 4 2 3 1 1 1 1
21.06.11	10	2 3 2 1 3 3 2 2
25.09.13	4	2 2 2 1 1 1 0 1

В таблице 2 приведена количественная характеристика возмущения или бури при конкретном значении K_p - индекса [6].

Таблица 2 – Количественная характеристика возмущения или бури

K_p -индекс	Количественная характеристика возмущения или бури
0	Крайне слабое возмущение
1	Сверхслабое возмущение
2	Очень слабое возмущение
3	Слабая буря
4	Весьма умеренная буря
5	Умеренная буря

С помощью таблицы 2 можно сделать вывод, что выбранные для анализа квазипериодических вариаций дни являются магнитоспокойными ($A_p \leq 10$, $K_p \leq 3$).

Результаты наблюдений. Целью наблюдений было выявить ПИВ не в одном, а в целом наборе параметров – вариациях мощности δP , температур

электронов δT_e и ионов δT_i , в характерные геофизические периоды.

Результаты наблюдений представлены на рис. 1. Решение о прохождении ПИВ принималось при наличии квазигармонических вариаций во всех рассмотренных зависимостях, если их периоды, диапазоны высот и время наблюдения были близки между собой.

Из рис. 1 видно, что имели место ярко выраженные волновые процессы с различными периодами и длительностью, охватывающие широкий диапазон высот и проявляющиеся как в вариациях мощности, так и в вариациях температур электронов и ионов. Наклон линий равной фазы указывает на то,

что источники ПИВ находились в нижней атмосфере, скорее всего, на стратосферных высотах.

Визуальный анализ полученных зависимостей показал, что наибольшую энергию имеют волны с периодом близким к 60 мин.

С ростом высоты относительные амплитуды ПИВ сначала увеличивались за счет уменьшения плотности нейтральной и ионизирующей составляющих атмосферы, достигали максимума на высотах 200 – 250 км и дальше уменьшались за счет усиления роли молекулярной вязкости, теплопроводности и амбиполярной диффузии.

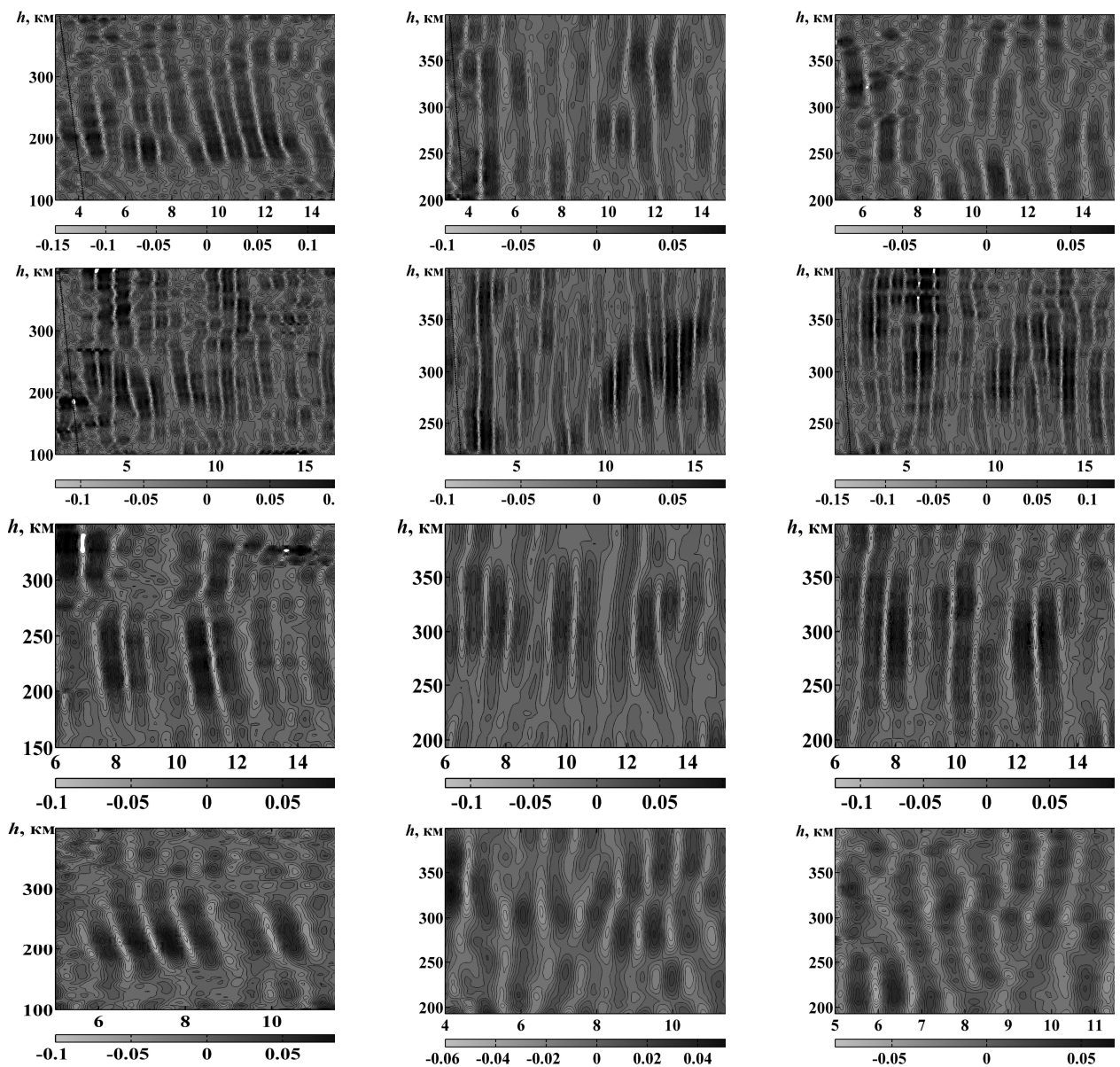


Рис. 1 – Высотно-временные вариации мощности (левый столбец), температуры электронов (средний столбец), и температуры ионов (правый столбец) в диапазоне периодов 40 – 80 мин в периоды зимнего солнцестояния – 19.12.14 г. (верхняя панель); весеннего равноденствия – 25.03.09 г. (вторая панель); летнего солнцестояния – 21.06.11 г. (третья панель); осеннего равноденствия – 25.09.13 г. (нижняя панель). Пунктирной линией показаны утренний и вечерний солнечные терминаторы.

Можно сделать вывод, что продолжительность ПИВ обычно не превышала 2 – 5 периодов. Относительные амплитуды вариаций мощности НР сигнала составляли 0,1 – 0,3, а для температур электронов и ионов они равнялись 0,03 – 0,1.

Во время зимнего солнцестояния ПИВ имели место примерно с 8:00 до 13:00 UT. В период весеннего равноденствия возмущения наблюдались с 7:00 до 15:00 UT. Для летнего солнцестояния волны отслеживаются с 9:00 до 13:00 UT, а во время осеннего равноденствия наиболее выражено проявили себя с 6:00 до 10:00 UT.

В утренние часы после восхода Солнца и вечером вблизи захода происходило усиление волновой активности. При этом ПИВ, сопровождавшие утренний СТ наблюдались с запаздыванием, а вечерний СТ – с опережением относительно времени прохождения СТ на исследуемых ионосферных высотах.

Выводы. Применение метода НР дает возможность получать обширную информацию о параметрах волновых процессов в ионосферной плазме. При помощи разработанного в Институте ионосферы пакета программ была проведена обработка экспериментальных данных. Результаты наблюдений показали, что во все сезоны имели место ПИВ, четко проявляющиеся в вариациях мощности НР сигнала и температурах электронов и ионов. Для всех исследованных событий вертикальная фазовая скорость ПИВ была направлена вниз и увеличивалась с ростом высоты. Это указывает на то, что источники возмущений находились в нижней атмосфере.

Показано, что преобладающие периоды возмущений составляли 40 – 80 мин, а их длительность не превышала 2 – 5 периодов. Относительные амплитуды ПИВ принимали значения 0.1 – 0.3 для мощности НР сигнала, а для температур электронов и ионов равнялись 0.03 – 0.1.

Список литературы

1. Панасенко С.В. Фильтрация временных вариаций мощности некогерентно рассеянного сигнала при наличии нерегулярных помех и сбоев аппаратуры / Панасенко С.В. // Сборник научных трудов "Вестник НТУ "ХПИ". Тематичний випуск "Радіофізика та іоносфера" – 2011. – № 44 – С. 40-44.
2. Богомаз А.В. Пакет программ нового поколения для обработки данных радаров некогерентного рассеяния Unified Processing of the Results of Incoherent Scatter Experiments (UPRISE) / А.В. Богомаз, Д.В. Котов // Вісник НТУ "ХПИ". Серія «Радіофізика та іоносфера» – 2013. – №28 (1001). – С. 29-37.
3. Mishin E. V. Disturbances of F-region electron density following solar terminator during the WITS period of 16–20 March / E. V. Mishin // J. Atmos. Terr. Phys. – 1991. – Vol. 53, N 6/7. – P. 643–648.
4. Somsikov V.M. On the formation of atmospheric inhomogeneities in the solar terminator region / V.M. Somsikov, B. Ganguly // J. Atmos. Terr. Phys. 1995. V.57. N12. P. 1513-1523.
5. <http://www.swpc.noaa.gov/products/planetary-k-index>.
6. Черногор Л. Ф. Фізика геокосмічних бур: монографія / Л. Ф. Черногор, І. Ф. Домнін. – Х.: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2014. – 408 с.
7. 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.
8. Панасенко С. В. Обнаружение перемещающихся ионосферных возмущений в квазипериодических вариациях мощности некогерентно рассеянного сигнала / С. В. Панасенко, А. О. Мамедов // Вісник НТУ «ХПИ». Сер.: Радіофізика та іоносфера – 2013. – № 33 (1066). – С. 12–18.
9. Пуляев В. А. Определение параметров ионосферы методом некогерентного рассеяния радиоволн. монография / В. А. Пуляев, Д. А. Дзюбанов, И. Ф. Домнин // Харьков: Вид-во «Підручник НТУ «ХПИ», 2010. - 240 с.
10. Dominici P. On the origin of medium-period ionospheric waves and their possible modeling: a short review / P. Dominici, L. R. Cander, B. Zolesi // Annali di geofisica. –1997. – Vol. 15, N 5. – P. 1171–1178.

References (transliterated)

1. Panasenko S.V. Fil'tracija vremennyh variacij moshhnosti nekogerentno rassejannogo signala pri nalichii nereguljarnyh pomeh i sboev apparatury [Filtering temporal variations of power incoherent scatter signal in the presence of irregular interference and equipment malfunction]. *Sbornik nauchnyh trudov "Vestnik NTU "HPI". Tematychnyj vy'pusk "Radiofizyka ta ionosfera"* [Bulletin of the Kharkov Polytechnic Institute. Special issue: Radiophysics and ionosphere]. 2011, no.44, pp. 40-44. Print.
2. Bogomaz A.V., Kotov D.V. Paket programm novogo pokolenija dlja obrabotki dannjah radarov nekogerentnogo rassejanija Unified Processing of the Results of Incoherent Scatter Experiments (UPRISE) [Software package of a new generation of programs for the treatment of incoherent scatter radar data]. *Visnyk NTU "XPI". Serija "Radiofizika i ionosfera"* [Bulletin of the Kharkov Polytechnic Institute. Series: Radiophysics and ionosphere]. 2013, no. 28 (1001), pp. 29-37. Print.
3. Mishin E. V. Disturbances of F-region electron density following solar terminator during the WITS period of 16–20 March. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1991, vol. 53, n.6/7, pp. 643–648. Print.
4. Somsikov V.M., Ganguly B. On the formation of atmospheric inhomogeneities in the solar terminator region. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1995, v.57, n.12, pp. 1513-1523. Print.
5. <http://www.swpc.noaa.gov/products/planetary-k-index>.
6. Chornogor L. F., Domnin I. F. Fyzyka geokosmichny'x bur [Physics of geospace storms]. *Monografija*. – X.: XNU imeni V. N. Karazina. 2014, p.408. Print.
7. Kirchengast G. Gravity waves determined by modeling of traveling ionospheric disturbances in incoherent-scatter radar measurements. *Radio Sci.* 1995, v. 30, no. 5, pp.1551–1567. Print.
8. Panasenko S. V., Mamedov A. O. Obnaruzhenie peremeshhajushhihsja ionosfernyh vozmushhenij v kvaziperiodicheskijh variacijah moshhnosti nekogerentno rassejannogo signala [Detection of traveling ionospheric disturbances in the quasi-periodic variations of incoherent scatter signal power]. *Visnyk NTU «XPI»*. Ser.: *Radiofizyka ta ionosfera*. [Bulletin of the Kharkov Polytechnic Institute. Series: Radiophysics and ionosphere] 2013, no. 33 (1066), pp.12–18. Print.
9. Puljaev V. A., Dzjubanov D. A., Domnin I. F. Opredelenie parametrov ionosfery metodom nekogerentnogo rassejanija radiovoln [Determination of the parameters of the ionosphere by incoherent scatter technique of radio waves]. *Monografija - Kharkiv: Vy'd-vo «Pidruchnyk NTU «XPI»*. 2010, p. 240. Print.
10. Dominici P., Cander L. R., Zolesi B. On the origin of medium-period ionospheric waves and their possible modeling: a short review. *Annali di geofisica*. 1997, vol. 15, n. 5, pp. 1171–1178. Print.

Поступила (received) 15.09.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Сезонные вариации параметров волновых процессов в ионосфере по данным метода некогерентного рассеяния / Е. Д. Аксёнова, С. В. Панасенко // Вісник НТУ «ХПИ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х. : НТУ «ХПИ», 2016. – № 34 (1206). – С. 73–77. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2078-9998.

Сезонні варіації параметрів хвильових процесів в іоносфері за даними методу некогерентного розсіяння / К. Д. Аксьонова, С. В. Панасенко // Вестник НТУ «ХПИ». Серія: Радиофизика и ионосфера. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2016. – № 34 (1206). – С. 73–77. – Библиогр.: 10 назв. – ISSN 2078-9998.

Seasonal variations in the parameters of wave processes in the ionosphere according to the method of incoherent scattering / K. D. Aksonova, S. V. Panasenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Radiophysics and ionosphere. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – No. 34 (1206). – P. 73–77. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2078-9998.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Аксёнова Катерина Дмитрівна – викладач-стажист Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”, м. Харків, тел. (057) 707-62-52; e-mail: katya.aksen@rambler.ru.

Аксёнова Екатерина Дмитриевна – преподаватель-стажер Национального технического университета “Харьковский политехнический институт”, г. Харьков, тел. (057) 707-62-52; e-mail: katya.aksen@rambler.ru .

Aksonova Kateryna Dmytrivna – teacher- trainee National technical university “Kharkiv polytechnic institute”, Kharkiv; phone: (057) 706-22-87; e-mail: katya.aksen@rambler.ru.

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 Valentynovych – 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.