

УДК 550.388.2, 551.510.535, 537.874.4

М. А. ШУЛЬГА

ИССЛЕДОВАНИЕ ВАРИАЦИЙ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ИОНОВ ВОДОРОДА ВО ВНЕШНЕЙ ИОНОСФЕРЕ В ПЕРИОД МАКСИМУМА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ ПО ДАННЫМ МЕТОДА НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ

Представлены результаты исследования высотно-временных вариаций относительной концентрации ионов водорода в верхней ионосфере над Украиной в период максимумов 23-го и 24-го циклов солнечной активности с использованием данных радара некогерентного рассеяния Института ионосферы. Данное исследование позволило выявить, как изменяется поведение ионов водорода после длительного солнечного минимума и провести сравнительный анализ результатов наблюдений между 23-м и 24-м максимумами солнечной активности. Проведено сопоставление данных наблюдений с прогнозами эмпирической (IRI) и физической (SAMI3) моделей.

Ключевые слова: ионный состав, верхняя ионосфера, относительная концентрация ионов водорода, метод некогерентного рассеяния, максимум солнечной активности, эмпирическая модель, физическая модель.

Представлені результати дослідження висотно-часових варіацій відносної концентрації іонів водню у верхній іоносфері над Україною в період максимумів 23-го та 24-го циклу сонячної активності з використанням даних радара некогерентного розсіювання Інституту іоносфери. Дане дослідження дозволило виявити як змінюється поведінка іонів водню після довготривалого сонячного мінімуму і провести порівняльний аналіз результатів спостережень між 23-м і 24-м максимумами сонячної активності. Проведено співставлення даних спостережень з прогнозами емпіричної (IRI) та фізичної (SAMI3) моделей.

Ключові слова: іонний склад, верхня іоносфера, відносна концентрація іонів водню, метод некогерентного розсіювання, максимум сонячної активності, емпірична модель, фізична модель.

We presented the results of investigation altitude and diurnal variations of the relative concentrations of hydrogen ions in the topside ionosphere over Ukraine during the 23-th and 24-th solar maximums using incoherent scatter (IS) radar data of Institute of the ionosphere. This investigation made it possible to reveal how changes the behavior of hydrogen ions after extended solar minimum and make comparative analysis of the results of observations between the 23-th and 24-th solar maximums. The observed variations are compared with predictions of empirical (IRI) and physical (SAMI3) models.

Keywords: ion composition, upper ionosphere, relative concentration of hydrogen ions, incoherent scatter method, maximum of solar activity, empirical model, physical model.

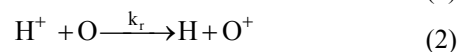
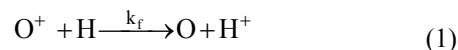
Введение. Метод некогерентного рассеяния (НР) радиоволн является одним из самых эффективных методов в радиофизике и позволяет получать информацию об основных ионосферных параметрах и их вариациях для длительного периода времени и в широком диапазоне высот. К основным параметрам ионосферы относятся концентрация электронов (N_e), температуры ионов (T_i) и электронов (T_e), скорость движения плазмы (V_d) и ионный состав [1–2].

Исследование высотно-временных вариаций ионного состава внешней ионосферы (над максимумом ионизации) имеет важное фундаментальное и прикладное значение. Результаты таких исследований приводят к лучшему пониманию взаимодействия ионосферы и плазмосферы [3].

Ионы водорода H^+ являются основной ионной составляющей в наиболее удаленной части земной атмосферы, которая оказывает заметное влияние на ионосферу (вторичная роль принадлежит не менее важным и интересным по своему поведению ионам гелия He^+) [4]. Это наиболее лёгкие ионы (их масса в 16 раз и в 4 раза меньше массы ионов атомарного кислорода и ионов гелия соответственно). Вследствие этого, высотно-временные вариации абсолютной и относительной концентраций ионов H^+ в значительной мере подвержены влиянию химических и динамических процессов (таких как амбиполярная диффузия или нейтральные ветры), которые ответственны за ионосферно-плазмосферное взаимодействие [2, 5].

В дополнение к вышеописанным процессам, значительное влияние на поведение ионов водорода имеет процесс резонансного обмена зарядом между

ионами (атомами) водорода и атомами (ионами) кислорода, который может существенно модифицировать их распределение в верхней ионосфере [6].



где k_f и k_r – прямая и обратная скорости реакций ($cm^3 \cdot s^{-1}$); T_n , T_i – температура нейтральной атмосферы и ионов соответственно.

Вертикальное распределение электронной концентрации N_e также подвергается всем процессам, которые значительно влияют на ионный состав около высоты максимума электронной концентрации и выше. Вследствие этого, любые заметные изменения в ионном составе могут значительно изменить высотное распределение электронной концентрации. Таким образом, надёжные результаты экспериментальных наблюдений лёгких ионов в верхней ионосфере важны. Полученные результаты позволяют получить более качественную оценку эффективности влияния динамических и химических процессов в верхней ионосфере на наблюдаемые вариации относительной концентрации ионов водорода $N(H^+)/N_e$ при различных состояниях космической погоды.

Последний солнечный максимум (2012–2014) следует за длительным и глубоким солнечным минимумом (2007–2009) [7,8]. В течение этого периода, верхняя атмосфера была значительно охлаждена. Кроме того, текущий солнечный максимум значительно слабее предыдущего

© М. О. Шульга, 2016

солнечного максимума (см. рис. 1). Поэтому интересно сравнить наблюдаемые высотные и суточные вариации относительных концентраций водорода в течение 23-го и 24-го солнечных максимумов. Это позволит понять, как поведение ионов водорода после продолжительного солнечного минимума отличается от вариаций в предшествующие периоды максимальной солнечной активности.

Цель данной работы – представить высотно-временные вариации относительного содержания ионов водорода в верхней ионосфере, используя данные радара некогерентного рассеяния Института ионосферы для 23-го и 24-го цикла солнечной активности, сопоставить полученные вариации $N(H^+)/N_e$ с результатами, предоставляемыми эмпирической (IRI) и физической (SAM3) моделями и предложить возможные объяснения отличий между данными наблюдений и прогнозами моделей.

Результаты наблюдений. Наблюдения высотно-временных вариаций относительной концентрации ионов водорода были проведены для дат близких к летнему солнцестоянию с относительно спокойным состоянием космической погоды для 2000, 2004 и 2012 – 2015 (см. рис. 1).

Для обработки данных был использован специализированный программный пакет UPRISE (Unified Processing of the Results of Incoherent Scatter Experiments), разработанный в Институте ионосферы [9].

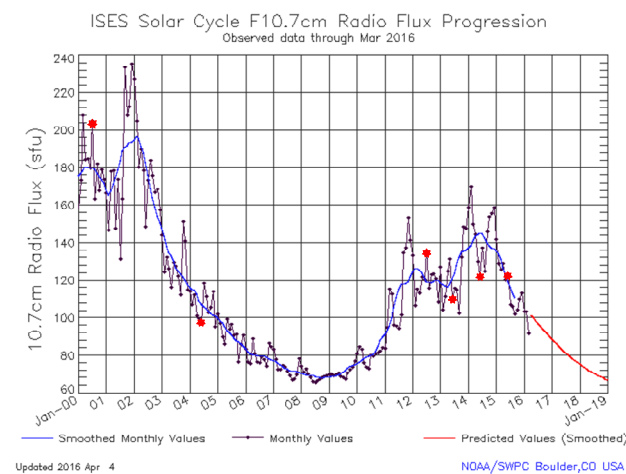


Рис. 1. – Вариации индекса солнечной активности (красными звёздочками выделены даты для которых проведены исследования)

На рисунках 2 и 3 представлены вариации экспериментальных и модельных оценок параметра $N(H^+)/N_e$. Рассмотрим их основные особенности.

Для всех исследуемых дат относительная концентрация ионов водорода увеличивается с ростом высоты. Для дневного времени оценка параметра $N(H^+)/N_e$ низкая (не превышает 7 %) так как основным источником образования ионов водорода является не ионизирующее излучение Солнца, а реакция обмена зарядами между O^+ и атомами водорода, которые в дневное время на нижних высотах присутствуют в небольших количествах [2, 10]. Ночью, когда верхняя

атмосфера охлаждена, $N(H^+)/N_e$ достигает максимальных значений. Наибольшее количество ионов водорода наблюдается близко к полуночи, за счёт переработки кислородной плазмы в ионосфере в водородную в результате реакции (1). Среднее максимальное значение на протяжении 24-го максимума солнечной активности варьируется около 15 – 20 %, для 23-го – не больше 15 %.

Такое поведение ионов водорода в ночное время суток может быть отчасти вызвано поступающим из плазмосферы в ионосферу потоком ионов H^+ . Образовавшиеся в дневное время ионы водорода (реакция (2)), диффундируют вверх и заполняют магнитные силовые трубки. Ночью, когда ионизационные процессы в ионосфере ослабевают, электронная концентрация и температуры заряженных частиц уменьшаются, что приводит к уменьшению давления плазмы у основания трубки. Это, в свою очередь, приводит к появлению потока ионов водорода из плазмосферы и увеличению их относительной концентрации на высотах верхней ионосферы [2, 6, 11]. Другой, возможно, наиболее важной причиной увеличения параметра $N(H^+)/N_e$ может быть ночное увеличение концентрации нейтрального водорода в термосфере [2, 10].

Сравнение полученных результатов для максимумов 23-го и 24-го цикла солнечной активности. Сравнение высотно-временных вариаций $N(H^+)/N_e$, наблюдавшихся с помощью харьковского радара некогерентного рассеяния в периоды максимумов солнечной активности, подтверждает известный факт, что относительная концентрация ионов водорода уменьшается с увеличением солнечной активности [12] (см. рис. 2).

1 – 2 июля 2000 г. ($F_{10.7} = 16$, $K_p = 2$, $A_p = 9$) максимальное значение параметра $N(H^+)/N_e$ составляло 6%. Для тех же высоты и времени 25 – 26 июня 2014 г. $N(H^+)/N_e$ достигало 20%, 19 – 20 июня 2012 г. – примерно 12%. Вариации $N(H^+)/N_e$ 15 – 16 июня 2004 г. имеют сходный характер с результатами, полученными для 24-го цикла (максимальное значение $N(H^+)/N_e$ достигало 12 %). Это связано с тем, что в этот период наблюдался спад солнечной активности (см. рис. 1).

Сравнение экспериментальных данных с оценками моделей IRI-2012 и SAM3. Сравнение, представленное на рисунках 2 и 3, показывает, что модель IRI некорректно описывает вариации относительной концентрации ионов H^+ .

Видно, что в дневные часы модель IRI, в целом, достаточно достоверно отображает реальные значения $N(H^+)/N_e$, тогда как в ночное время суток модельные значения параметра $N(H^+)/N_e$ имеют максимальные расхождения с экспериментальными данными (модель заметно занижает содержание ионов водорода). Такие отличия, среди прочего, могут быть вызваны тем, что модель не отображает региональную специфику физических процессов в среднеширотной ионосфере (например, влияние на ионы водорода процесса обмена плазмой между ионосферой и лежащей выше плазмосферой), тем самым не позволяя делать

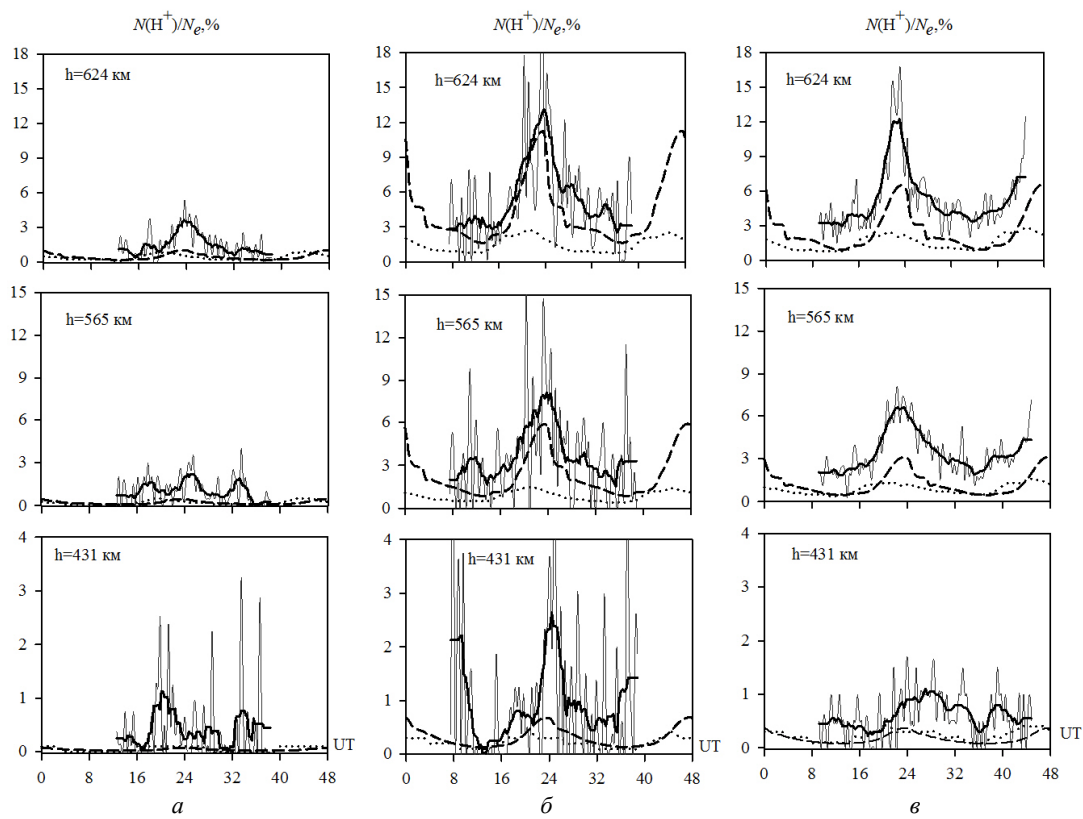


Рис. 2. – Высотно-временные вариации параметра $N(H^+)/N_e$: *a* – 1 – 2 июля 2000 г., *б* – 15 – 16 июня 2004 г., *в* – 19 – 20 июня 2012 г. Здесь и далее тонкая сплошная линия показывает экспериментальные данные, точечная и пунктирная – данные моделей IRI-2012 и SAMI3 соответственно. Жирная сплошная линия показывает усреднённые экспериментальные данные.

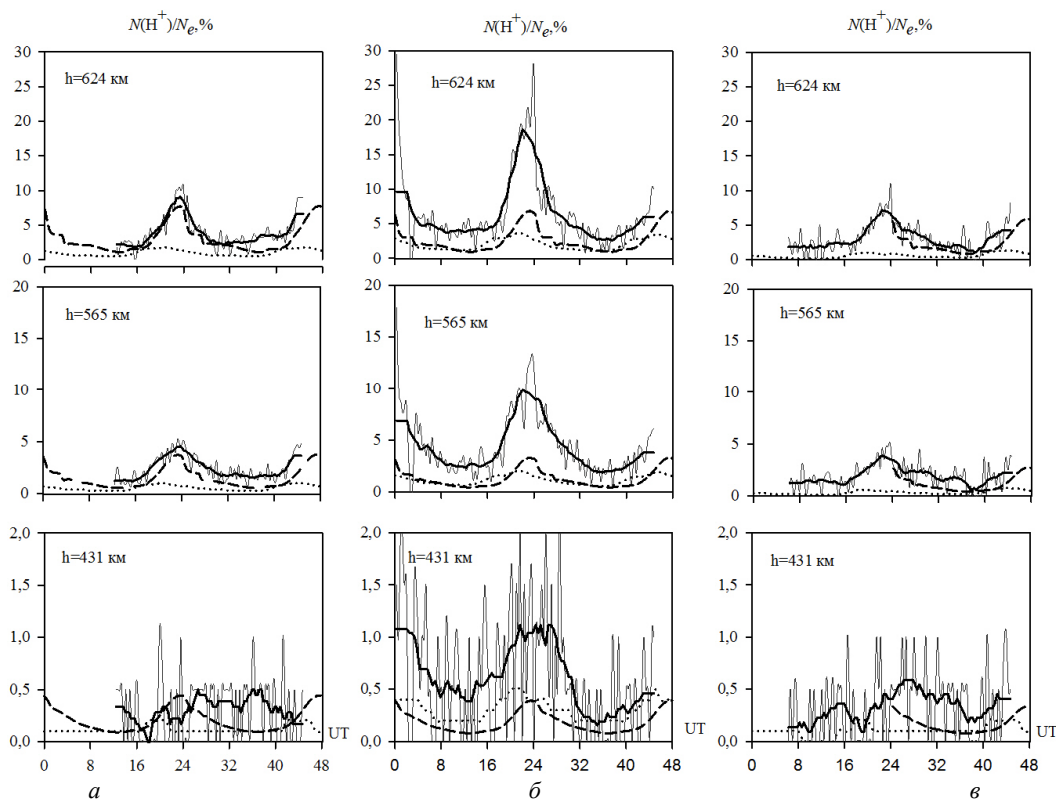


Рис. 3. – Высотно-временные вариации параметра $N(H^+)/N_e$: *a* – 18 – 19 июня 2013 г., *б* – 25 – 26 июня 2014 г., *в* – 18 – 19 июня 2015 г.

надёжные выводы об их поведении в верхней ионосфере. Такая ситуация может быть связана с недопустимо сильным пространственным и временным усреднением большого количества данных наблюдений. В свою очередь, ионосфера постоянно подвергается сильным пространственным и временным изменениям, которые зависят от солнечной активности, электрических и магнитных полей, термосферных циркуляций и метеорологических процессов в нижней и верхней атмосфере. Вследствие этого, механизмы формирования ионосферы различны на разных высотах и вариации $N(H^+)/N_e$ также могут отличаться в разных регионах ионосферы.

Кроме упомянутых факторов, важной причиной заметного занижения параметра $N(H^+)/N_e$ моделью может быть занижение этой величины непосредственно в спутниковых измерителях ионного состава, данные которых использованы для построения модели [13].

Физическая модель SAMI3 даёт значительно лучшее согласие с экспериментальными данными. Особенно это видно в дневное время суток почти для всех исследуемых дат. В ночные же часы модельные значения в несколько раз ниже экспериментальных (почти в 3 раза для 2000 г. и в 4 раза для 2014 г.), тогда как в периоды спада и подъёма солнечной активности наблюдается лучшее согласование результатов (см. рис 2 б и 3 а).

Выводы. 1. Установлено, что в исследуемом диапазоне высот концентрация ионов H^+ увеличивается с высотой, достигая максимальных значений в ночное время суток. Предположительно основными причинами являются увеличение концентрации термосферного водорода в ночные часы, а также, отчасти, усиление нисходящих потоков ионов H^+ из плазмосферы. **2.** Сравнение результатов, полученных с помощью харьковского радара некогерентного рассеяния для 23-го и 24-го максимумов солнечной активности, подтвердило известный факт, что величина $N(H^+)/N_e$ уменьшается с увеличением солнечной активности. **3.** Представленные результаты сравнения наблюдаемых вариаций $N(H^+)/N_e$ и прогнозов моделей IRI и SAMI3 позволили выявить, что модели значительно занижают содержание ионов водорода в ночные часы. Наибольшие расхождения (до ~4 раз) наблюдались между данными радара HP и эмпирической модели IRI-2012.

Список литературы

1. Evans J. V. Theory and practice of ionosphere study by Thomson scatter radar / J. V. Evans // Proc. IEEE. – 1969. – V. 57, № 4. – P. 496–530. doi: 10.1109/PROC.1969.7005
2. Брюнелли Б. Е. Физика ионосферы / Б. Е. Брюнелли, А. А. Намгалдзе. – М.: Наука, 1988. – 528 с.
3. Кринберг И. А. Ионосфера и плазмосфера / И. А. Кринберг, А. В. Тацлин. – М.: Наука, 1984. – 356 с.
4. Bauer S. J. Hydrogen and helium ions. Theoretical considerations and observations obtained by ion mass spectrometry on spacecraft, ground-based backscatter, and VLF observations on satellites / S. J. Bauer // IAGA Aeronomy Symposium (August 16 – 20, 1965, Cambridge, Massachusetts). – United States: NASA Goddard Space Flight Center, 1965.

5. King J. W. Upper atmospheric winds and ionospheric drifts caused by neutral air pressure gradients / J. W. King, H. Kohl // Nature. – 1965. – V. 206, № 4985. – P. 699 – 701. doi: 10.1038/206699a0
6. Schunk R. Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry / R. Schunk, A. Nagy. – New York: University Press, 2009. – 628 p.
7. Heelis R. A. Behavior of the O^+/H^+ transition height during the extreme solar minimum of 2008 / R. A. Heelis, W. R. Coley, A. G. Burrell, M. R. Hairston, G. D. Earle, M. D. Perdue, R. A. Power, L. L. Harmon, B. J. Holt, C. R. Lippincott // Geophysical Research Letters. – 2009. – V. 36, L00C03. doi: 10.1029/2009GL038652
8. Apponte N. Measurements of the O^+ to H^+ transition height and ion temperatures in the lower topside ionosphere over Arecibo for equinox conditions during the 2008–2009 extreme solar minimum / N. Apponte, C. G. M. Brum, M. P. Sulzer, S. A. Gonzalez // Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 2013. – V. 36, № 7. – P. 4465 – 4470. doi: 10.1002/jgra.50416
9. 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 «ХПІ». Сер.: Радіофізика та іоносфера. – 2013. – № 28 (1001). – С. 29–37.
10. Котов Д. В. Сезонные вариации относительной концентрации ионов водорода над Украиной по данным метода некогерентного рассеяния и их сопоставление с данными модели IRI-2012. 2. Максимум солнечной активности / Д. В. Котов // Радиофізика і астрономія. – 2013. – Т. 18, № 1. – С. 43–48.
11. Акасофу С. И. Солнечно-земная физика. Ч. 1 / С. И. Акасофу, С. Чепмен. – М.: Мир, 1974. – 384 с.
12. Truhlik V. Manifestation of solar activity in the global topside ion composition – a study based on satellite data / V. Truhlik, L. Triskova, J. Smilauer // Annales Geophysicae. – 2005. – V. 23, № 7. – P. 2511 – 2517. doi: 10.5194/angeo-23-2511-2005
13. Котов Д. В. Сезонные вариации относительной концентрации ионов водорода над Украиной по данным метода некогерентного рассеяния и их сопоставление с данными модели IRI-2012. 1. Минимум солнечной активности / И. Ф. Домнин, Д. В. Котов, Л. Ф. Черногор // Радиофізика і астрономія. – 2012. – Т. 17, № 3. – С. 233–239.

References (transliterated)

1. Evans J. V. Theory and practice of ionosphere study by Thomson scatter radar. Proc. IEEE. 1969, vol. 57, no. 4, pp. 496–530. doi: 10.1109/PROC.1969.7005
2. Brjunelli B. E., Namgaladze A. A. Fizika ionosfery [Physics of the ionosphere]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 528 p.
3. Krinberg I. A., Tashhilin A. V. Ionosfera i plazmosfera [Ionosphere and plasmasphere]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 356 p.
4. Bauer S. J. Hydrogen and helium ions – Theoretical considerations and observations obtained by ion mass spectrometry on spacecraft, ground-based backscatter, and VLF observations on satellite. IAGA Aeronomy Symposium (August 16 – 20, 1965, Cambridge, Massachusetts). United States, NASA Goddard Space Flight Center Publ., 1965.
5. King J. W., Kohl H. Upper atmospheric winds and ionospheric drifts caused by neutral air pressure gradients. Nature, 1965, vol. 206, issue 4985, pp. 699 – 701. doi: 10.1038/206699a0
6. Schunk R., Nagy A. Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry. New York, University Press, 2009. 628 p.
7. Heelis R. A., Coley W. R., Burrell A. G., Hairston M. R., Earle G. D., Perdue M. D., Power R. A., Harmon L. L., Holt B. J., Lippincott C. R. Behavior of the O^+/H^+ transition height during the extreme solar minimum of 2008. Geophysical Research Letters, 2009, vol. 36, L00C03. doi: 10.1029/2009GL038652
8. Apponte N., Brum C. G. M., Sulzer M. P., Gonzalez S. A. Measurements of the O^+ to H^+ transition height and ion temperatures in the lower topside ionosphere over Arecibo for equinox conditions during the 2008–2009 extreme solar minimum. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2013, vol. 36, no. 7, pp. 4465 – 4470. doi: 10.1002/jgra.50416
9. Bogomaz A. V., Kotov D. V. Paket programm novogo pokolenija dlja obrabotki dannyh radarov nekogerentnogo rassejanija Unified Processing of the Results of incoherent Scatter Experiments (UPRISE) [New generation program for data processing Incoherent Scatter Radar (UPRISE)]. Visnyk NTU «KhPI». Ser.: Radiofizyka ta

- ionosfera* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Radiophysics and ionosphere]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2013, no. 28, pp. 29–37.
10. Kotov D. V. Sezonnnye variacii odnositel'noj koncentracii ionov vodoroda nad Ukrainoj po dannym metoda nekogerentnogo rassejanija i ih sopostavlenie s dannymi modeli IRI-2012. 2. Maksimum solnechnoj aktivnosti [Seasonal variations of the relative concentration of hydrogen ions in the upper ionosphere over Ukraine according to the method of incoherent scattering and their comparison with estimates of model IRI-2012. 1. Maximum of solar activity]. *Radiofizika i astronomija*. 2013, vol. 18, no.1, pp. 43–48.
 11. Akasofu S. I. *Solnechno-zemnaia fizika*. Ch.1 [Solar-terrestrial physics]. Moscow, Mir Publ., 1974. 384 p.
 12. Truhlik V., Triskova L., Smilauer J. Manifestation of solar activity in the global topside ion composition – a study based on satellite data. *Annales Geophysicae*, 2005, vol. 23, no. 7, pp. 2511 – 2517. doi: 10.5194/angeo-23-2511-2005
 13. Kotov D. V. Sezonnnye variacii odnositel'noj koncentracii ionov vodoroda nad Ukrainoj po dannym metoda nekogerentnogo rassejanija i ih sopostavlenie s dannymi modeli IRI-2012. 1. Minimum solnechnoj aktivnosti [Seasonal variations of the relative concentration of hydrogen ions in the upper ionosphere over Ukraine according to the method of incoherent scattering and their comparison with estimates of model IRI-2012. 1. Minimum of solar activity]. *Radiofizika i astronomija*. 2012, vol. 17, no. 3, pp. 233–239.

Поступила (received) 12.09.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Дослідження варіацій відносної концентрації іонів водню у зовнішній іоносфері в період максимуму сонячної активності за даними методу некогерентного розсіювання / М. О. Шульга // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – X. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 34 (1206). – С. 58–62. – Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2078-9998.

Исследование вариаций относительной концентрации ионов водорода во внешней ионосфере в период максимума солнечной активности по данным метода некогерентного рассеяния / М. А. Шульга // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – X. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 34 (1206). – С. 58–62. – Библиогр.: 13 назв. – ISSN 2078-9998.

Investigation variations of the relative concentration of hydrogen ions in the upper ionosphere during the period of maximum solar activity using incoherent scatter technique / М. О. Shulga // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Radiophysics and ionosphere. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – No. 34 (1206). – С. 58–62. – Bibliogr.: 13. – ISSN 2078-9998.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Шульга Марина Олексіївна – інженер-електронік 1 категорії, Інститут іоносфери НАН і МОН України, м. Харків; тел.: (057) 707-65-88; e-mail: marina.shulga23@gmail.com.

Шульга Марина Алексеевна – инженер-электроник 1 категории, Институт ионосферы НАН и МОН Украины, г. Харьков; тел.: (057) 707-65-88; e-mail: marina.shulga23@gmail.com.

Shulga Maryna Oleksiivna – engineer-electronic 1-st category, Institute of ionosphere, Kharkiv; phone: (057) 707-65-88; e-mail: marina.shulga23@gmail.com.