

УДК 550.388,  
520.16+523.31+523.9:520.86

Д. В. КОТОВ

Институт ионосферы НАН и МОНМС Украины,  
ул. Краснознаменная, 16, г. Харьков, 61002, Украина  
E-mail: dmitrykotoff@gmail.com

## СЕЗОННЫЕ ВАРИАЦИИ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ИОНОВ ВОДОРОДА ВО ВНЕШНЕЙ ИОНОСФЕРЕ НАД УКРАИНОЙ ПО ДАННЫМ МЕТОДА НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ И ИХ СОПОСТАВЛЕНИЕ С ДАННЫМИ МОДЕЛИ IRI-2012. 2. МАКСИМУМ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

*Приведены результаты наблюдений с помощью харьковского радара некогерентного рассеяния высотно-временных вариаций относительной концентрации ионов водорода для четырех сезонов в период максимума 23-го цикла солнечной активности. Проведено сравнение полученных результатов с результатами наблюдений в период минимума солнечной активности и с данными модели IRI-2012.*

*Ключевые слова:* метод некогерентного рассеяния радиоволн, ионосферная плазма, ионный состав, относительная концентрация ионов водорода

### 1. Введение

Многолетние экспериментальные и теоретические исследования вариаций относительной концентрации ионов водорода  $N(H^+)/N$  позволили не только установить основные особенности пространственно-временных характеристик таких вариаций, но и выявить их чрезвычайную чувствительность практически к любым изменениям в гео- и гелиофизической обстановке [1–6]. Это обстоятельство объясняет неослабевающий интерес к исследованиям поведения легких ионов как одного из важнейших индикаторов состояния космической погоды [7]. Достоверные данные о распределении легких ионов необходимы также для создания новых и уточнения существующих моделей ионосферы [8–10].

Известно, что основной массив экспериментальных данных о вариациях параметра  $N(H^+)/N$ , использованный для построения существующих моделей ионного состава внешней ионосферы, получен с помощью спутниковых измерений [1, 3, 11]. В работе [12] были подробно охарактеризованы недостатки таких измерений, принципиально не позволяющие получать достоверную информацию о суточных вариациях параметра  $N(H^+)/N$ , и сделан вывод о том, что непрерывные экспериментальные данные об ионном составе внешней ионосферы для определенного региона могут предоставить только исследовательские комплексы некогерентного рассеяния (НР) [13, 14]. Было также отмечено [12], что радары НР, способные

исследовать ионный состав во внешней ионосфере, расположены в регионах с существенно отличающимися геомагнитными координатами, вследствие чего распределения ионов водорода во внешней ионосфере над этими радарными зонами значительно отличаются, и наблюдать вариации концентрации ионов водорода в условиях, характерных для среднеширотной ионосферы, позволяет лишь радар Института ионосферы НАН и МОНМС Украины (г. Харьков). В работе [12] были представлены и обсуждены результаты исследований высотно-временных (включая сезонные) вариаций относительной концентрации ионов водорода, полученные с помощью радара НР Института ионосферы в период глубокого минимума 23-го цикла солнечной активности, и проведено сопоставление полученных результатов с данными модели International Reference Ionosphere (IRI) - 2012 [13, 14].

Цель настоящей работы – представить вариации параметра  $N(H^+)/N$ , наблюдавшиеся с помощью радара НР Института ионосферы в течение четырех сезонов в период максимума 23-го цикла солнечной активности, а также сравнить полученные результаты с данными для минимума солнечной активности и с соответствующими данными модели IRI.

### 2. Состояние космической погоды

Выбранные для анализа данные соответствовали максимуму солнечной активности. На протяжении всего рассматриваемого периода индекс  $F_{10.7}$

(определяющий плотность потока радиоизлучения Солнца на длине волны 10.7 см и измеряемый в единицах  $10^{-22} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{Гц}^{-1}$ ) изменялся значительно, чем в условиях минимума солнечной активности [12]: для 12 апреля 2000 г.  $F_{10.7} = 173$ , для 2 июля 2000 г.  $F_{10.7} = 162$ , для 16–17 октября 2001 г.  $F_{10.7}$  изменялся от 207 до 217, для 12–13 декабря 2000 г. – от 150 до 165.

Геоманнитная обстановка в выбранные дни была спокойной. Планетарный индекс геомагнитной активности  $K_p$  не превышал значения 4, а индекс  $A_p$  был не больше 8.

Таким образом, состояние космической погоды в рассматриваемые дни можно считать спокойным.

### 3. Средства и методы

Данные о вариациях параметра  $N(\text{H}^+)/N$  получены с помощью радара НР Института ионосферы. Подробное описание местоположения и характеристик радара приведено в [12, 14].

При измерениях параметров внешней ионосферы в рассматриваемый период длительность излучаемого импульса составляла  $T_p \approx 795$  мкс, а соответствующее высотное разрешение – около 120 км (данные в период минимума солнечной активности были получены с разрешением около 100 км). Временное разрешение (интервал, на котором усредняются измеренные автокорреляционные функции НР сигнала), как и для минимума солнечной активности, составляло 60 мин. При анализе данных радара Института ионосферы использовались новые методические разработки, описанные в работах [15–17].

Погрешность оценок параметра  $N(\text{H}^+)/N$ , зависящая от состояния ионосферы, определялась по результатам статистического моделирования в соответствии с предложенным в работе [18] способом. Рассчитанные доверительные интервалы (одно стандартное отклонение) показаны на графиках, представляющих результаты наблюдений.

Отметим, что высокий уровень солнечной активности, вызвавший увеличение значений концентрации электронов в ионосфере (и, как следствие, рост отношения сигнал/шум для анализируемых сигналов), позволял получать достоверные данные о параметрах ионосферной плазмы на значительно больших (чем в случае миниму-

ма солнечной активности) высотах. Так, весной и летом предельная высота измерений достигала примерно 950 км (в минимуме солнечной активности эта высота в среднем не превышала 600 км).

### 4. Результаты наблюдений

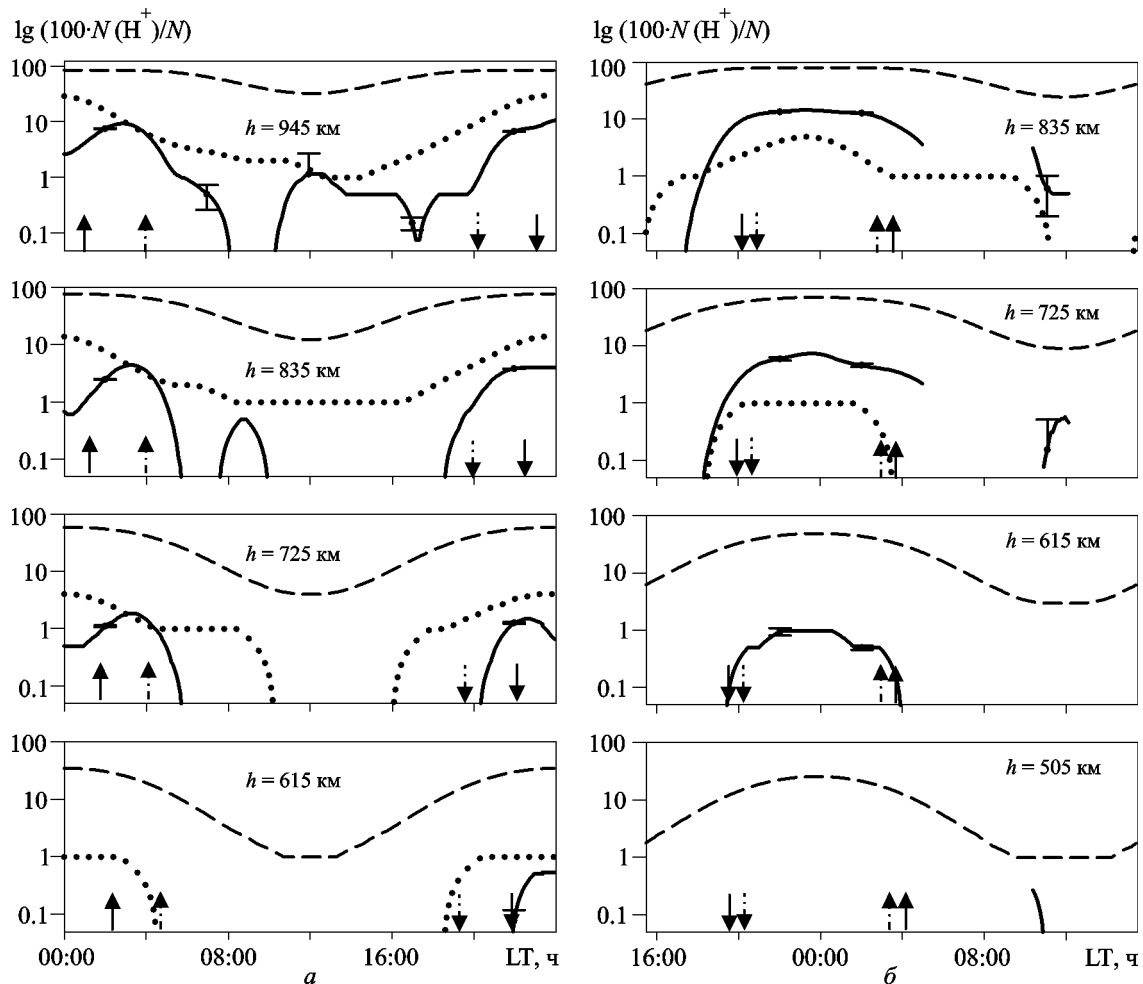
Временные вариации относительной концентрации ионов водорода на определенных высотах, наблюдавшиеся с помощью радара Института ионосферы в выбранные дни (по возможности близкие к равноденствиям и солнцестояниям), представлены на рис. 1 и рис. 2. Рассмотрим основные особенности вариаций.

Во все сезоны значение параметра  $N(\text{H}^+)/N$  увеличивалось с ростом высоты. Максимальные значения регистрировались в околополуночные часы, минимальные – в околополуденное время. Форма суточных вариаций  $N(\text{H}^+)/N$  во все сезоны имеет монотонный характер (исключение составляют лишь суточные вариации на высоте 945 км 2 июля 2000 г.).

Четкая и однозначная связь между моментом местного восхода (захода) Солнца и началом уменьшения (возрастания) параметра  $N(\text{H}^+)/N$  отсутствует. Влияния восхода (захода) Солнца на вариации относительной концентрации ионов водорода в магнитосопреженной точке не отмечено.

Относительная концентрация ионов водорода на всех рассматриваемых высотах не достигала 50 %. Максимальные значения параметра  $N(\text{H}^+)/N$  наблюдались в зимний сезон, достигая примерно 40 % на высоте 725 км около 02:00 LT (здесь и далее LT – местное солнечное время). Максимальное значение на той же высоте летом не превышало 3 %, осенью – 7 %, весной – 2 %. В околополуденные часы ионы водорода не регистрировались (лишь зимой на высоте 725 км дневное значение параметра  $N(\text{H}^+)/N$  составляло около 2 %, что находится в пределах статистического разброса данных). Значения относительной концентрации ионов водорода в осенний сезон были несколько выше, чем в весенний.

Высотные вариации величины  $N(\text{H}^+)/N$  также зависят от сезона. Так, например, 12–13 декабря 2000 г. в 02:00 LT значения  $N(\text{H}^+)/N$  на высотах 725, 615 и 505 км примерно равны 40, 17 и 5 % соответственно. А 16–17 октября 2001 г.



**Рис. 1.** Высотно-временные вариации параметра  $N(H^+)/N$  12 апреля 2000 г. (а) и 16–17 октября 2001 г. (б). На этом и следующем рисунке сплошной линией показаны экспериментальные данные, точками – данные модели TTS, штриховой линией – данные модели Данилова–Яичникова. Сплошными стрелками показаны моменты восхода и заката Солнца на данной высоте над Ионосферной обсерваторией Института ионосферы, штриховыми стрелками – соответствующие моменты над магнитосопряженной точкой

значения  $N(H^+)/N$  на тех же высотах и в то же время составляют 4, 0.5 и 0 %.

### 5. Сравнение с результатами, полученными в период минимума солнечной активности

Сравнение вариаций относительной концентрации ионов водорода, полученных в периоды максимума и минимума солнечной активности, позволило выявить следующие основные отличия.

В весенний, осенний и летний сезоны в период максимума активности ионы водорода начинают появляться в количестве, превышающем ошибку измерений, только на высотах не менее 600 км. В период минимума активности на высоте 600 км

в ночное время для упомянутых сезонов значение параметра  $N(H^+)/N$  достигало уже 70 %, т. е. водород был доминирующим ионом [12].

Временные вариации  $N(H^+)/N$  в период минимума активности были гораздо менее монотонными, при переходе к дневным условиям происходило значительно более резкое уменьшение относительной концентрации ионов водорода, в вечерних условиях отмечалось столь же резкое увеличение  $N(H^+)/N$  [12].

Скорость увеличения значений параметра  $N(H^+)/N$  с ростом высоты в период максимума активности также имела значительно меньшую величину, чем в период минимума активности. Например, в зимний сезон скорость увеличения параметра  $N(H^+)/N$  с высотой от значения при-

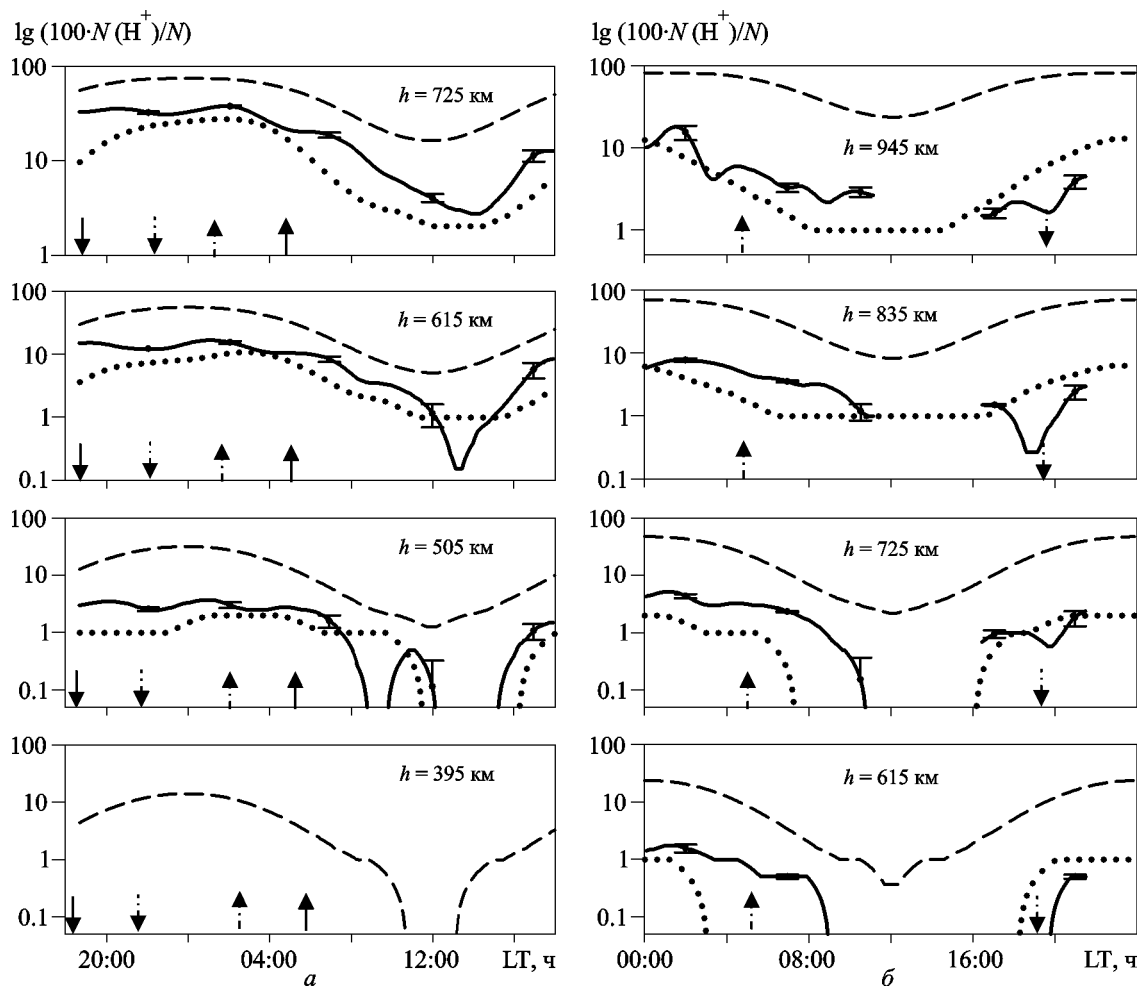


Рис. 2. Высотно-временные вариации параметра  $N(H^+)/N$  12–13 декабря 2000 г. (а) и 2 июля 2000 г. (б)

мерно 10 % до значения 30 % в 02:00 LT составляла примерно 0.6 %/км в период минимума и лишь 0.1 %/км в период максимума активности.

В целом можно сделать вывод, что полученные результаты подтверждают известный факт о сильной зависимости содержания легких ионов в ионосфере от уровня солнечной активности [6].

### 6. Сравнение с данными модели IRI-2012

Результаты, представленные в настоящей работе, как и результаты, полученные в период минимума солнечной активности [12], сопоставлены с данными моделей ионного состава Данилова–Яичникова [9] и TTS [10].

Вариации параметра  $N(H^+)/N$ , рассчитанные для рассматриваемых дат и высот с использованием этих моделей, представлены на рис. 1, 2.

Сравнение данных радара Института ионосферы с модельными вариациями выявило следующие основные отличия.

Для всех сезонов и рассматриваемых высот модель Данилова–Яичникова дает значительно завышенные относительно результатов эксперимента значения параметра  $N(H^+)/N$ . Абсолютная величина наблюдаемых различий возрастает при переходе к ночным условиям. Так, например, для 12 апреля 2000 г. для 03:00 LT и высоты 945 км экспериментальная оценка параметра  $N(H^+)/N \approx 10\%$ , тогда как соответствующее значение, предоставляемое моделью Данилова–Яичникова, равно 80 %, для высоты 725 км и 02:00 LT 13 декабря 2000 г. разность между экспериментальным и модельным значениями достигает примерно 45 %. Значительные (до 30 %) расхождения отмечаются и в дневное время.

Данные модели TTS количественно значительно лучше согласуются с результатами эксперимента. Однако для зимнего, летнего и осеннего сезонов значения  $N(H^+)/N$  в модели TTS в несколько раз ниже экспериментальных. Например, в 00:00 LT 17 октября 2001 г. значение параметра  $N(H^+)/N$  достигло 15 %, а модель TTS для этих условий дает около 4 %. Для 12 апреля 2000 г., напротив, модельные значения  $N(H^+)/N$  выше.

В целом можно говорить о количественных и некоторых качественных отличиях сезонных высотно-временных вариаций параметра  $N(H^+)/N$ , полученных в эксперименте и с помощью модели ионного состава IRI-2012.

## 7. Обсуждение

Представленные результаты наблюдений и отмеченные особенности вариаций параметра  $N(H^+)/N$  соответствуют существующим физическим представлениям о поведении ионов водорода во внешней ионосфере [6] и могут быть объяснены различиями в тепловом и динамическом режимах ионосферы, которые существенно зависят от гелиогеофизических условий. Этот вывод относится как к высотному, так и к временному (включая сезонные изменения и изменения в цикле солнечной активности) поведению относительной концентрации ионов водорода.

Отмеченное расхождение между результатами эксперимента и данными модели TTS может быть объяснено в рамках гипотезы, предложенной в работе [12] и связанной с возможным наличием систематических ошибок определения концентрации ионов водорода с помощью спутниковых методов. Что же касается упомянутого существенного завышения данных в модели Данилова–Яичникова, это, как представляется, связано с объективным отсутствием экспериментальных результатов, необходимых для построения модели, как раз для периода максимума солнечной активности. Вследствие этого модельные значения параметра для периода максимума солнечной активности были получены как результат экстраполяции значений, найденных по доступным данным для меньших значений индекса  $F_{10.7}$  [9].

Таким образом, результаты сравнения модельных зависимостей с экспериментальными для

периодов минимума и максимума солнечной активности убедительно свидетельствуют о том, что на современном этапе рано говорить о достоверном прогнозировании вариаций относительной концентрации ионов водорода над Украиной с помощью моделей Данилова–Яичникова и TTS.

Полученные в представленной работе и в работе [12] результаты показывают, что модель Данилова–Яичникова абсолютно неприменима в условиях максимума солнечной активности, а модель TTS не способна дать достоверные результаты в широком диапазоне высот в условиях минимума солнечной активности.

## 8. Выводы

1. С помощью радара НР Института ионосферы получены высотно-временные вариации относительной концентрации ионов водорода для четырех сезонов в период максимума 23-го цикла солнечной активности. Выявлены общие черты и характерные для отдельных сезонов особенности вариаций.

2. Проведено сравнение экспериментально полученных вариаций  $N(H^+)/N$  в периоды максимума и минимума солнечной активности, а также экспериментальных данных с данными моделей Данилова–Яичникова и TTS. Установлено, что распределения ионов водорода в условиях минимума и максимума солнечной активности существенно отличаются. Отмечено, что в большинстве рассмотренных случаев в период максимума солнечной активности значения  $N(H^+)/N$ , предоставляемые моделью Данилова–Яичникова, существенно выше экспериментальных значений.

3. На современном этапе существующие модельные картины высотно-временного распределения ионов водорода не отображают реального поведения параметра  $N(H^+)/N$  в ионосфере над Украиной.

Автор выражает благодарность профессору Л. Ф. Черногору за научное руководство, а также Л. Я. Емельянову, И. Б. Склярову, С. В. Черняву и А. Ф. Кононенко за помощь в проведении измерений на радаре НР Института ионосферы, А. В. Богомазу и М. Н. Сюсюк за содействие в анализе экспериментальных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chandra S., Troy, Jr., B. E., Donley J. L., and Bourdeau R. E. OGO 4 observations of ion composition and temperatures in the topside ionosphere // J. Geophys. Res. – 1970. – Vol. 75, No. 19. – P. 3867–3878.
2. Bankov L., Heelis R., Parrot M., Berthelier J., Marinov P, and Vassileva A. WN4 effect on longitudinal distribution of different ion species in the topside ionosphere at low latitudes by means of DEMETER, DMSP-F13 and DMSP-F15 data // Ann. Geophys. – 2009. – Vol. 27, No. 7. – P. 2893–2902.
3. Гладышев В. А., Щекотов А. Ю., Ягова Н. В., Бертелье Ж.-Ж., Парро М., Акенътиева О. С., Баранский Л. Н., Федоров Е. Н., Мулярчик Т. М., Молчанов О. А. Концентрация ионов в верхней ионосфере по измерениям на спутнике DEMETER. Морфология и зависимость от солнечной и геомагнитной активности // Космические исследования. – 2012. – Т. 50, № 2. – С. 109–121.
4. Richards P. G., Schunk R. W., and Sojka J. J. Large-Scale Counterstreaming of H<sup>+</sup> and He<sup>+</sup> Along Plasmaspheric Flux Tubes // J. Geophys. Res. – 1983. – Vol. 88, No. A10. – P. 7879–7886.
5. Heelis R. A., Hanson W. B. Interhemispheric transport induced by neutral zonal winds in the F-region // J. Geophys. Res. – 1980. – Vol. 85, No. A6. – P. 3045–3051.
6. Брюнелли Б. Е., Намаладзе А. А. Физика ионосферы. – М.: Наука, 1988. – 528 с.
7. Bilitza D. and Reinisch B. W. International Reference Ionosphere 2007: Improvements and new parameters // Adv. Space Res. – 2008. – Vol. 42, No. 4. – P. 599–609.
8. Сайт модели International Reference Ionosphere: <www.iri.gsfc.nasa.gov>.
9. Danilov A., and Yaichnikov A. A new model of the ion composition at 75 km to 1000 km for IRI // Adv. Space Res. – 1985. – Vol. 5, No. 3. – P. 75–79.
10. Triskova L., Truhlik V., and Smilauer J. An empirical model of ion composition in the outer ionosphere // Adv. Space Res. – 2003. – Vol. 31, No. 3. – P. 653–663.
11. Hanson W. B., Sanatani S., Zuccaro D., and Flowerday T. W. Plasma measurement with the retarding potential analyzer on OGO-VI // J. Geophys. Res. – 1970. – Vol. 75, No. 28. – P. 5483–5501.
12. Домнин И. Ф., Котов Д. В., Черногор Л. Ф. Сезонные вариации относительной концентрации ионов водорода во внешней ионосфере над Украиной по данным метода некогерентного рассеяния и их сопоставление с данными модели IRI-2012. 1. Минимум солнечной активности // Радиофизика и радиоастрономия. – 2012. – Т. 17, № 3. – С. 233–239.
13. Эванс Дж. В. Теоретические и практические вопросы исследования ионосферы методом некогерентного рассеяния радиоволн // ТИИЭР. – 1969. – Т. 8, № 4. – С. 139–175.
14. Таран В. И. Исследование ионосферы в естественном и искусственно возмущенном состояниях методом некогерентного рассеяния // Геомагнетизм и аэрономия. – 2001. – Т. 41, № 5. – С. 659–666.
15. Домнин И. Ф., Котов Д. В., Черногор Л. Ф. Оптимизация определения параметров ионосферной плазмы ме-

тодом некогерентного рассеяния // Нелинейный мир. – 2012. – № 6. – С. 380–386.

16. Сюсюк М. Н., Котов Д. В., Богомаз А. В. Моделирование двумерной функции неопределенности радара некогерентного рассеяния // Вестник Национального технического университета “ХПИ”, тематический выпуск “Радиофизика и ионосфера”. – № 44. – С. 81–84.
17. Котов Д. В., Черногор Л. Ф. Об особенностях наблюдения ионов гелия с помощью радаров некогерентного рассеяния // Сборник трудов XII конференции молодых ученых “Взаимодействие полей и излучения с веществом” БШФФ-2011. – Иркутск: Изд-во ИСЗФ СО РАН. – 2011. – С. 199–201.
18. Пат. 42311 Україна, МПК G015 13/95 Спосіб імітації суміші шумоподібного сигналу та завади із заданими спектрами. В. А. Пуляев, А. В. Богомаз, Д. В. Котов. № заявки 4200901462; Заявл. 20.02.2009; Опубл. 25.06.2009. – Бюл. № 12/2009.

Д. В. Котов

Інститут іоносфери НАН і МОНМС України,  
вул. Червонопрапорна, 16, м. Харків, 61002, Україна

СЕЗОННІ ВАРІАЦІЇ ВІДНОСНОЇ КОНЦЕНТРАЦІЇ ІОНІВ ВОДНЮ У ЗОВНІШНІЙ ІОНОСФЕРІ НАД УКРАЇНОЮ ЗА ДАНИМИ МЕТОДУ НЕКОГЕРЕНТНОГО РОЗСІЯННЯ ТА ЇХ ПОРІВНЯННЯ З ДАНИМИ МОДЕЛІ IRI-2012.  
2. МАКСИМУМ СОНЯЧНОЇ АКТИВНОСТІ

Наведено результати спостережень за допомогою харківського радара некогерентного розсіяння висотно-часових варіацій відносної концентрації іонів водню для чотирьох сезонів у період максимуму 23-го циклу сонячної активності. Виконано порівняння отриманих результатів з результатами спостережень у період мінімуму сонячної активності та з даними моделі IRI-2012.

D. V. Kotov

<sup>1</sup>Institute of Ionosphere, National Academy of Sciences of Ukraine and Ministry of Education and Science, Youth and Sports of Ukraine,  
16, Chervonopraporna St., Kharkiv, 61002, Ukraine

SEASONAL VARIATIONS OF HYDROGEN IONS FRACTION IN THE TOPSIDE IONOSPHERE OVER UKRAINE ACCORDING TO THE INCOHERENT SCATTERING TECHNIQUE DATA AND COMPARISON WITH IRI-2012 MODEL DATA.  
2. SOLAR ACTIVITY MAXIMUM

The results of observations of altitude and temporal variations in the hydrogen ions fraction for four seasons during the maximum of 23rd solar activity cycle using the Kharkiv incoherent scatter radar are presented. The observed variations are compared with the results obtained for minimum of solar activity and with the IRI-2012 data model.

Статья поступила в редакцию 19.12.2012