

*Д.В. КОТОВ*, н.с., Институт ионосферы, Харьков;  
*М.А. ШУЛЬГА*, бакалавр, студент, НТУ “ХПИ”

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВАРИАЦИЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ИОНОВ ВОДОРОДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ РАДАРА НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ

В статье представлены результаты моделирования концентрации ионов  $H^+$  в условиях химического равновесия. Моделирование проведено с использованием данных радара некогерентного рассеяния Института ионосферы. Проведено сопоставление результатов моделирования с данными наблюдений с помощью радара НР.

**Ключевые слова:** некогерентное рассеяние, моделирование, ионы водорода.

У статті представлено результати моделювання концентрації іонів  $H^+$  в умовах хімічної рівноваги. Моделювання проведено з використанням даних радару некогерентного розсіяння Інституту іоносфери. Виконано співставлення результатів моделювання з даними спостережень за допомогою радару НР.

**Ключові слова:** некогерентне розсіяння, моделювання, іони водню.

The results of modeling of  $H^+$  ions concentration under a chemical equilibrium conditions are presented. Modeling is carried out using the Institute of the ionosphere incoherent scatter radar data. The comparison of modeled data and the results of observations are made.

**Keywords:** incoherent scatter, modeling, hydrogen ions.

**Введение.** Метод некогерентного рассеяния (НР) позволяет получать информацию не только о вариациях параметров ионосферной плазмы, которые принято считать основными (концентрация электронов  $N$ , температуры ионов  $T_i$  и электронов  $T_e$ ). С помощью метода НР одновременно с упомянутыми параметрами возможно оценить характеристики ионного состава плазмы – абсолютные и относительные концентрации ионов различных сортов [1].

Особую роль в процессах, влияющих на состояние ионосферы Земли, играют ионы водорода  $H^+$ . Это наиболее лёгкие ионы (их масса в 16 раз превышает массу ионов атомарного кислорода и в 4 раза – массу ионов гелия), вследствие чего их высотно-временные вариации в значительной мере подвержены влиянию динамических процессов, ответственных за ионосферно-плазмозферное взаимодействие [2, 3].

Поведение концентрации ионов водорода  $N(H^+)$ , как и концентрации любого другого иона, описывается уравнениями движения и непрерывности [4]. Уравнение непрерывности для ионов  $H^+$  имеет вид:

$$\frac{\partial N[H^+]}{\partial t} = q(H^+) - L(H^+) - \operatorname{div}\Phi(H^+). \quad (1)$$

© Д.В. Котов, М.А. Шутьга, 2013

Здесь  $q(\text{H}^+)$  – скорость образования ионов  $\text{H}^+$ ,  $L(\text{H}^+)$  – скорость потерь за счёт химических процессов,  $\text{div } \Phi(\text{H}^+) = \text{div}(N(\text{H}^+) \mathbf{v})$  – источник образования (или потерь) ионов за счёт процессов переноса,  $\mathbf{v}$  – скорость переноса.

Уравнение (1) для стационарных условий ( $\frac{\partial N[\text{H}^+]}{\partial t} = 0$ ) может иметь два асимптотических решения, соответствующих химическому либо диффузионному равновесию. Химическое равновесие имеет место при условии  $q(\text{H}^+) = L(\text{H}^+)$ .

Поскольку моделирование динамических процессов и рассмотрение их влияния на распределение  $N(\text{H}^+)$  представляет собой весьма сложную задачу, на первом этапе целесообразно сравнить результаты наблюдений вариаций  $N(\text{H}^+)$  с результатами моделирования  $N(\text{H}^+)$  в предположении наличия в рассматриваемой области ионосферы условий химического равновесия для ионов  $\text{H}^+$ . Полученные результаты позволят качественно оценить сравнительное влияние химических и динамических процессов на наблюдаемые вариации  $N(\text{H}^+)$ .

**Цель работы** – провести моделирование суточных вариаций концентрации  $N(\text{H}^+)$  в предположении химического равновесия для ионов  $\text{H}^+$ , после чего сравнить результаты экспериментальных исследований с результатами моделирования и сделать выводы о степени влияния динамических процессов на вариации ионов водорода, наблюдаемые с помощью радара НР Института ионосферы.

**Моделирование.** Как известно, поведение ионов водорода в различных областях ионосферы контролируется различными процессами. На нижних высотах главным процессом, определяющим концентрацию ионов  $\text{H}^+$ , является процесс резонансного обмена зарядом между ионами водорода и атомами кислорода (O) [2]:



Почти с такой же скоростью процесс обмена зарядом протекает в обратном направлении – ионы  $\text{O}^+$  исчезают, отдавая свой заряд нейтральным атомам водорода (2)



В условиях химического равновесия концентрация ионов  $\text{H}^+$  определяется двумя указанными выше конкурирующими процессами. Величина этой концентрации может быть оценена с помощью выражения, учитывающего скорости протекания реакций (2) и (3), следующим образом [2]:

$$N[\text{H}^+] = 1.13 \frac{N(\text{O}^+) N(\text{H})}{N(\text{O})} \sqrt{\frac{T_n}{T_i}}. \quad (4)$$

Здесь  $T_n$ ,  $T_i$  – температуры нейтральных атомов и ионов соответственно,  $N(\text{O}^+)$ ,  $N(\text{O})$ ,  $N(\text{H})$  – концентрации ионов атомарного кислорода, атомов нейтрального кислорода и водорода соответственно.

При теоретическом моделировании концентрации  $\text{H}^+$  необходимо использовать модель нейтральной атмосферы ( $T_n$ ,  $N(\text{O})$ ,  $N(\text{H})$ ), а также модели температуры ионов и ионного состава ( $N(\text{O}^+)$ ). Наиболее надёжной среди таких моделей является модель нейтральной атмосферы. Модели же температур заряженных частиц и ионного состава до настоящего времени всё ещё не обеспечивают удовлетворительную точность прогнозируемых оценок температур и – в особенности – концентраций ионов [5]. Вследствие этого результаты моделирования  $N(\text{H}^+)$  в соответствии с выражением (4) могут содержать значительные систематические ошибки, что не позволит корректно сравнить данные наблюдений и моделирования.

В настоящей работе для моделирования помимо модельных данных ( $T_n$ ,  $N(\text{O})$ ,  $N(\text{H})$ ) использовались экспериментальные данные ( $N(\text{O}^+)$  и  $T_i$ ). Такой подход позволил получить максимально достоверные результаты моделирования  $N(\text{H}^+)$ , поскольку измеренные значения  $N(\text{O}^+)$  и  $T_i$  полностью соответствуют (с точностью до погрешности измерений) значениям, которые эти параметры принимали в рассматриваемых условиях в конкретный момент времени на данной высоте.

Экспериментально полученные для дат, близких к весеннему и осеннему равноденствиям, зимнему и летнему солнцестояниям в минимуме солнечной активности, вариации концентрации ионов водорода, а также результаты моделирования этих вариаций в соответствии с выражением (4) представлены на рисунках 1, 2.

**Обсуждение результатов.** Рассмотрение результатов наблюдений и соответствующих результатов моделирования позволили выявить следующие основные особенности.

Результаты моделирования  $N(\text{H}^+)$  очень хорошо согласуются с данными наблюдений в околополуденные часы. В то же время, для всех сезонов в вечерние и ночные часы расхождения между результатами эксперимента и моделирования весьма значительны, причём результаты наблюдений на порядок превышают модельные значения для зимы, весны и осени, и в 2 – 3 раза – для лета.

По всей видимости, это свидетельствует о возникновении в вечерние часы достаточно сильных потоков плазмы, направленных на протяжении ночных часов из плазмосферы в ионосферу и приводящих к увеличению концентрации ионов водорода на высоте 505 км.

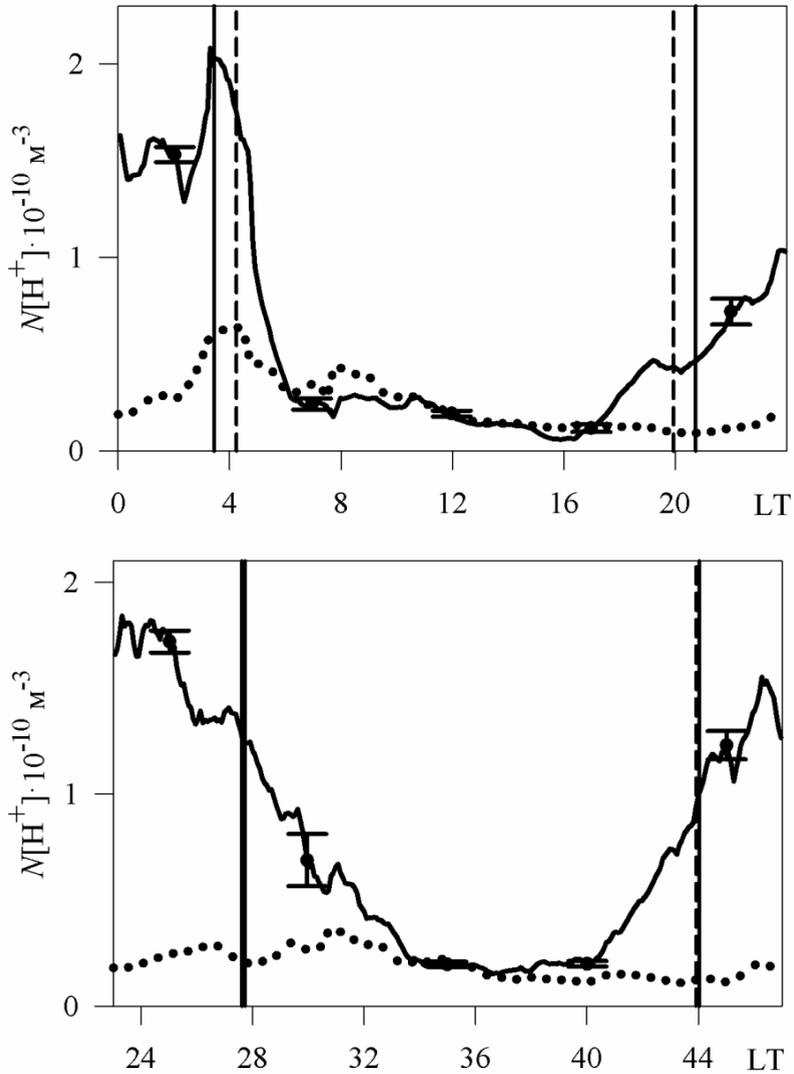


Рис. 1 – Суточные вариации концентрации ионов  $\text{H}^+$  на высоте 505 км 25 марта 2009 г. (верхняя панель) и 30 сентября 2009 г. (нижняя панель). Здесь и далее сплошной линией показаны данные радара НР Института ионосферы, точками – результаты моделирования  $N(\text{H}^+)$  в предположении химического равновесия для этих ионов

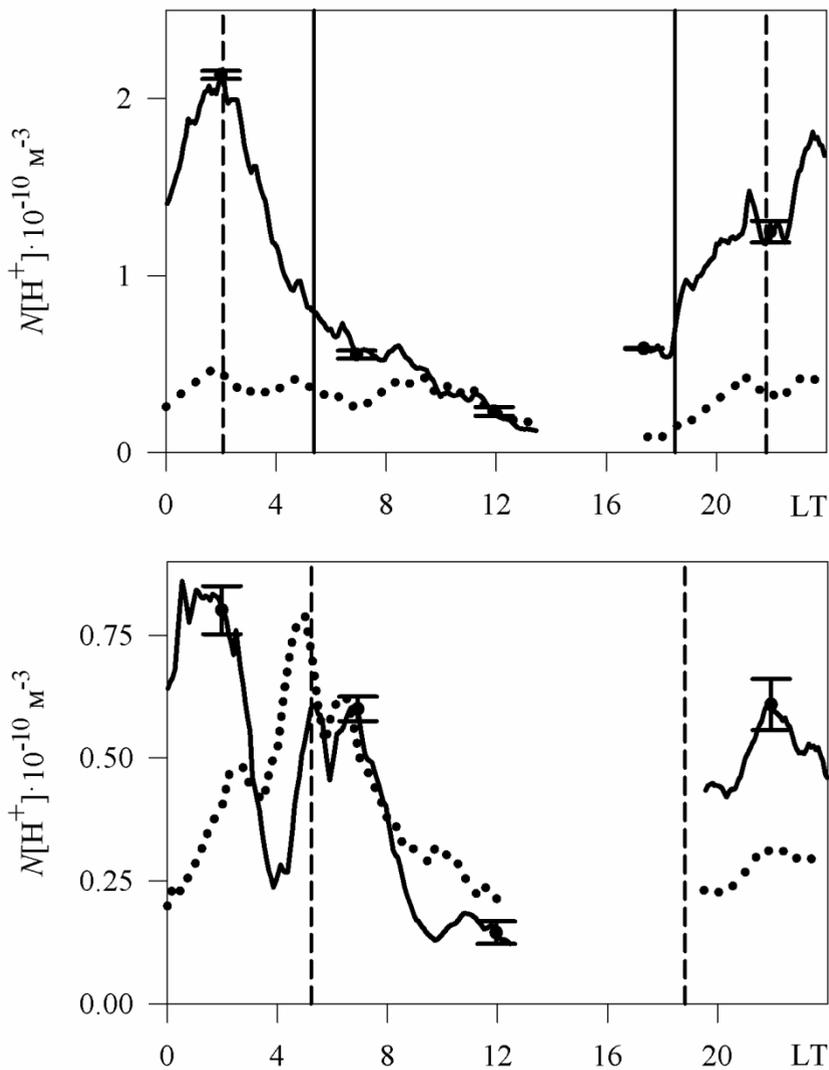


Рис. 2 – Суточные вариации концентрации ионов H<sup>+</sup> на высоте 505 км 20 декабря 2007 г. (верхняя панель) и 23 июня 2010 г. (нижняя панель)

Данное предположение хорошо согласуется с результатами экспериментальных исследований высотно-временных вариаций скорости переноса ионосферной плазмы над радаром Института ионосферы. Согласно

этим исследованиям, в условиях минимума солнечной активности в вечерние и ночные часы наблюдаются нисходящие (направленные из плазмосферы в ионосферу) потоки плазмы. В околополуденные часы около высоты 500 км скорость переноса плазмы близка к нулю. Следовательно, для дневных условий распределение концентрации ионов  $H^+$  оказывается близким к распределению, характерному для условий химического равновесия (или же к условиям статического диффузионного равновесия для случая  $N(H^+) \ll N(O^+)$ , которое также может реализовываться в дневное время на рассматриваемой высоте [2]).

**Список литературы:** 1. *Taran V.I.* Hydrogen Ion Study with Incoherent Scatter Method. 1. Comparison of Results Obtained at Kharkov, Arecibo and Millstone Hill Radars / *V.I. Taran, Ye.I. Grigorenko* // X Joint International Symposium "Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics" (July 2–5, 2002, Tomsk.) – 2002. – D3-17. 2. *Брюнелли Б.Е.* Физика ионосферы. / *Б.Е. Брюнелли, А.А. Намгаладзе.* – М.: Наука, 1988. – с. 528. 3. *MacPherson B.* The effects of meridional neutral winds on the  $O^+ - H^+$  transition altitude over Arecibo / *B. MacPherson, S.A. Gonzalez, G.J. Barley, R.J. Moffett, M.P. Sulzer* // *J. Geophys. Res.* – 1998. – Vol. 103. – №. A12. – P. 29183-29198. 4. *Millward G.H.* A Coupled Thermosphere-Ionosphere-Plasmasphere Model, СТИР. / *G.H. Millward, R.J. Moffett, S. Quegan, T.J. Fuller-Rowell* // STEP Handbook of Ionospheric Models, edited by R.W. Schunk, Utah State Univ. – 1996 b. 5. *Bilitza D.* International Reference Ionosphere 2007: Improvements and new parameters. / *Bilitza D., Reinisch B.W.* // *Adv. Space Res.* – 2008. – № 42. – P. 599-609.

*Поступила в редколлегию 17.04.2013*