

УДК 500.388, 520.16+
523.31+523.9:520.86

М. Н. СЮСЮК¹, Д. В. КОТОВ², Л. Ф. ЧЕРНОГОР³,
А. В. БОГОМАЗ²

PACS numbers: 93.30.Ge,
94.20.Cf, 94.20.Dm,
94.20.Fg

¹ Национальный технический университет
“Харьковский политехнический институт”,
ул. Кирпичева, 21, г. Харьков, 61002, Украина

² Институт ионосферы НАН и МОН Украины,
ул. Кирпичева, 16, г. Харьков, 61002, Украина

³ Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,
пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61022, Украина

ВАРИАЦИИ ПЛАЗМЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР В ИОНОСФЕРЕ НАД ХАРЬКОВОМ НА ФАЗЕ РОСТА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Цель работы: представить вариации температур электронов и ионов, полученные с помощью радара некогерентного рассеяния Института ионосферы НАН и МОН Украины на фазе роста 24-го цикла солнечной активности, а также сравнить их с соответствующими данными модели ионосферы IRI-2012.

Методы и методология: Данные получены методом некогерентного рассеяния, для их анализа использовались метод решения обратной радиофизической задачи и уточнение с помощью двумерной функции неопределенности.

Результаты: Обнаружено значительное различие между данными эксперимента и модельными данными. Так, для всех дней наблюдений, моделью превышались ночные значения температур и занижались дневные. Максимальные различия составляли около 500 К ночью и 800 К днем. Рассмотрены эффекты возникновения полуденного провала температур электронов в дни равноденствий.

Заключение: Подтверждено, что для адекватного описания процессов в ионосфере требуется системный подход, учитывающий, в частности, взаимодействие областей ионосферы, расположенных в магнитосопреженных областях. Отмеченные закономерности следует учитывать при коррекции модели ионосферы для Центрально-Европейского региона.

Ключевые слова: радар некогерентного рассеяния, температура электронов, температура ионов, полуденный провал, утренний и вечерний максимумы

1. Введение

Изучение тепловых процессов в ионосфере позволяет лучше понять поведение системы Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера и имеет важное фундаментальное и прикладное значение [1, 2].

В настоящее время существует ряд эмпирических моделей, основанных в большей степени на результатах спутниковых измерений, имеющих некоторые недостатки [3], такие как нерегулярность измерения параметров, отсутствие непрерывных данных над определенной локальной областью ввиду постоянного движения спутника по орбите и др. Таким образом, все еще не разработано адекватное представление о глобальной картине вариаций плазменных параметров. Это приводит к возрастанию потребности в новых более точных ионосферных экспериментальных данных, которые могут

быть предоставлены методом некогерентного рассеяния (НР).

Ввиду особенности 23-го цикла солнечной активности (1996–2008 гг.), а точнее его затяжного минимума, значительный интерес представляет процесс восстановления ионосферы на фазе роста 24-го цикла солнечной активности. Стоит отметить, что максимум солнечной активности в этом цикле был почти вдвое меньше, чем в предыдущих пяти циклах [4]. Цель настоящей работы – представить вариации температур электронов и ионов, полученных с помощью радара НР Института ионосферы НАН и МОН Украины (г. Харьков) для фазы роста 24-го цикла солнечной активности (2012–2013 гг.), а также сравнить полученные результаты с соответствующими данными модели IRI-2012 (International Reference Ionosphere).

2. Состояние космической погоды

Для анализа выбраны четыре характерных геофизических периода: летнее и зимнее солнцестояния, весеннее и осеннее равноденствия. Ионо-

сферные данные были получены на фазе роста солнечной активности. В этот период индекс $F_{10.7}$, определяющий плотность потока радиоизлучения Солнца на длине волны 10.7 см и измеряемый в единицах $10^{-22} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{Гц}^{-1}$, имел следующие значения: 20 марта 2013 г. $F_{10.7} = 109$, 19 июня 2013 г. $F_{10.7} = 128$, 26 сентября 2012 г. $F_{10.7} = 140$ и 18 декабря 2013 г. $F_{10.7} = 153$. Геомагнитная обстановка в выбранные дни была достаточно спокойной. Значение планетарного индекса геомагнитной активности K_p не превышало 4, индекс A_p был не больше 10 (дни, когда $A_p < 30$, считаются магнитоспокойными).

Данные о вариациях температур электронов T_e и ионов T_i получены с помощью радара НР. Радар расположен в Ионосферной обсерватории Института ионосферы (49°36' с. ш., 36°18' в. д.). Основные характеристики радара и методики, использованные при анализе данных, приведены в работе [5].

3. Результаты наблюдений

Временные вариации температур электронов и ионов, наблюдавшиеся с помощью радара НР в выбранные дни, представлены на рис. 1. На графиках указано всемирное время UT, а не местное LT, $UT = LT - 2$ ч в зимнее время и $UT = LT - 3$ ч в летнее время.

Рассмотрим основные особенности экспериментальных данных.

Доступный для наблюдений высотный диапазон был несколько ограниченным (300 ÷ 550 км) вследствие малых значений отношения сигнал/шум. В данном диапазоне высот происходит незначительный рост температур ионов и электронов с ростом высоты, а общий характер поведения температур сохраняется. Для сравнения с результатами проведенных ранее экспериментов [5] вариации температур представлены для одной конкретной высоты – 400 км. Экспериментальные погрешности не превышали 10 %, что составляет не больше ± 150 К.

Для всех рассматриваемых дат отмечался значительный рост температур электронов и относительно небольшой рост температур ионов при восходе Солнца и их спад после захода Солнца. В дни равноденствий отмечался полуденный провал температур электронов.

Минимальные температуры наблюдались в ночное время, когда температуры электронов и

ионов становились равными друг другу. В день летнего солнцестояния минимум температур наступил приблизительно в 00:00 UT и составил $T_e = T_i = 950$ К (рис. 1, а), а в день осеннего равноденствия – приблизительно в 00:30 UT и составил $T_e = T_i = 940$ К (рис. 1, б). В день зимнего солнцестояния минимум наблюдался в 23:00 UT, $T_e = T_i = 920$ К, (рис. 1, в), а в день весеннего равноденствия – в 23:30 UT, $T_e = T_i = 920$ К, (рис. 1, г).

Максимальные температуры электронов и ионов отмечались в утреннее время. Так, 19 июня 2013 г. T_e достигла 3040 К примерно в 05:30 UT, 26 сентября 2012 г. – 2700 К в 05:00 UT, 18 декабря 2013 г. – 2900 К в 06:30 UT и 20 марта 2013 г. $T_e = 2850$ К в 04:30 UT. Суточные вариации температур ионов имели плавный характер. Для всех рассматриваемых дат максимальное значение T_i не превышало 1200 К. 19 июня ионосфера полностью прогрелась к 02:00 UT, 20 марта и 26 сентября – к 03:00 UT, а 18 декабря – только к 04:30 UT. Процесс остывания ионосферы 18 декабря начался раньше, примерно в 15:00 UT. 20 марта и 26 сентября спад температур начался примерно в 16:00 UT, а 19 июня – еще на час позже. Наблюдался также специфический для дней равноденствий полуденный спад и образование двух максимумов температур электронов: утренний и вечерний максимумы. Утренний максимум наблюдался 20 марта в 04:30 UT и составил 2850 К – максимальное суточное значение температуры. В день осеннего равноденствия утренний максимум наблюдался в 05:00 UT и совпал с максимальным суточным значением 2700 К. Затем и 20 марта, и 26 сентября температура электронов снижалась с течением времени, и в 8:30 UT наблюдался полуденный провал соответственно до 2080 и 1930 К. Далее температура вновь начинала расти и приблизительно в 15:00 UT наблюдался вечерний максимум, соответственно 2500 и 2400 К.

4. Сравнение с данными модели IRI-2012

Для всех рассматриваемых дат модель IRI-2012 давала завышение ночных температур и занижение дневных температур по сравнению с результатами радарных наблюдений в Центрально-Европейском регионе. Например, 19 июня 2013 г. (рис. 1, а) минимальное значение температуры электронов наблюдалось в 00:00 UT и составило

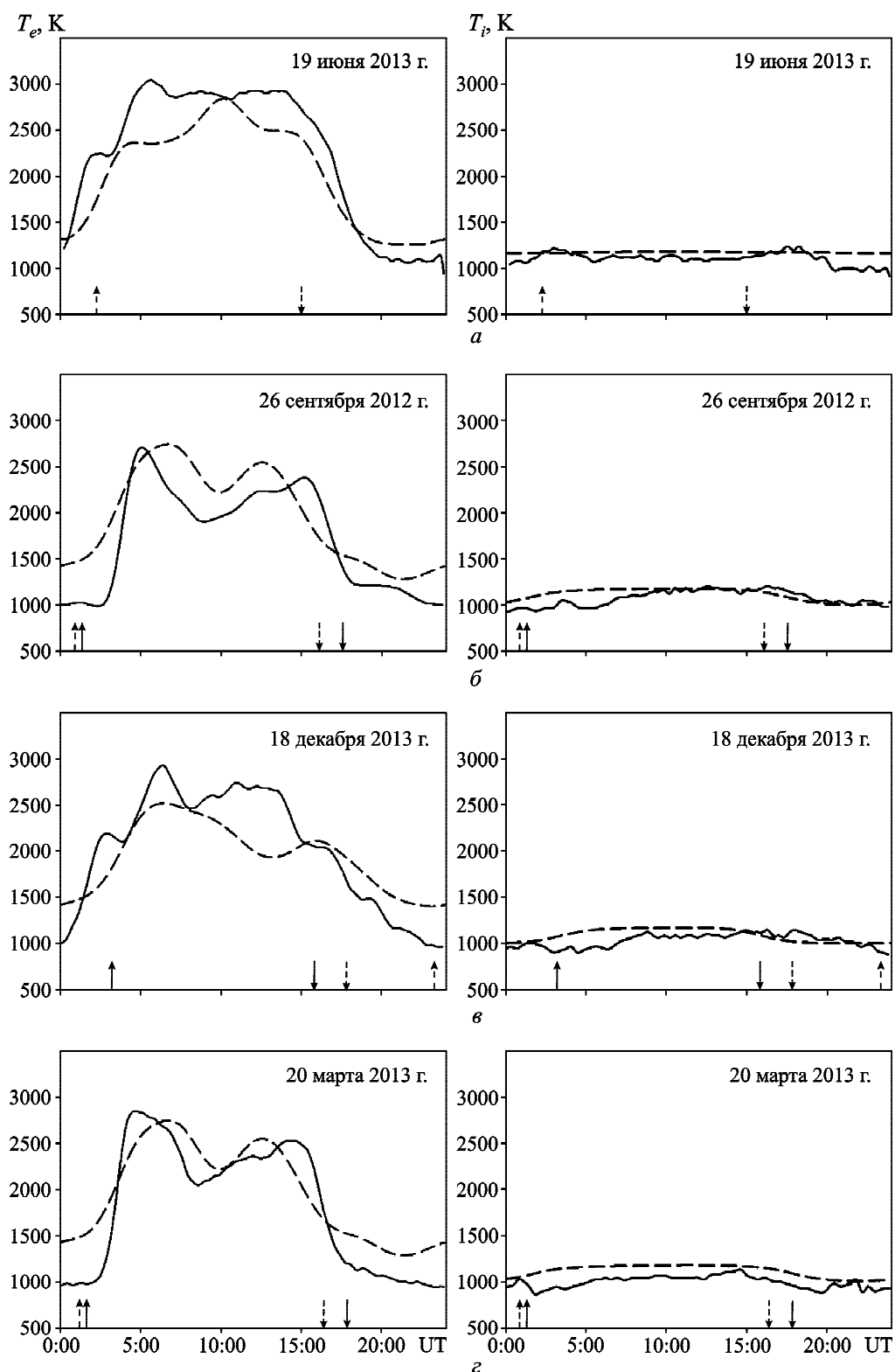


Рис. 1. Суточные вариации температур электронов и ионов: *а* – 19 июня 2013 г., *б* – 26 сентября 2012 г., *в* – 18 декабря 2013 г., *г* – 20 марта 2013 г. Сплошными линиями показаны экспериментальные данные, штрихованными линиями – соответствующие данные модели IRI-2012, сплошными стрелками показаны моменты восхода и захода Солнца на высоте 400 км над Ионосферной обсерваторией, штриховыми стрелками – соответствующие моменты для магнитосопряженной области

950 К, модель IRI-2012 для этого времени давала значение 1160 К. Далее, когда эксперимент показывал максимальное значение $T_e = 3040$ К, модель предоставляла значение, равное 2350 К. Суточный характер данных также отличался. Максимальные значения температур электронов согласно эксперименту приходились на утреннее время, 05:30 UT, тогда как согласно модели максимальные значения имели место примерно в 11:00 UT. Значения температур ионов, полученные в эксперименте и с помощью модели IRI-2012, довольно близки, различие между ними не превышало 200 К.

18 декабря 2013 г. (рис. 1, в) экспериментальное минимальное значение температуры электронов наблюдалось в 23:00 UT и составило 920 К, тогда как модель завышала это значение на 400 К. К полудню модель начинала занижать значения температур электронов. Так, в окрестности экспериментального максимума модель предоставляла значения примерно на 300 К меньшие. Значения температур ионов, полученные при помощи радара, как и для дня летнего солнцестояния, мало отличаются от модельных данных.

В дни весеннего и осеннего равноденствий наблюдались более существенные различия в ночных температурах электронов (рис. 1, б, г). Модель IRI-2012 завышала значения в $1.5 \div 2$ раза. Для дневного времени суток согласно модели также наблюдалось появление утреннего и вечернего максимумов. Они выражены слабее, чем в экспериментальных данных, и менее разнесены по времени. Так, 20 марта утренний и вечерний максимумы отмечались в 07:00 и 12:30 UT соответственно, а 26 сентября – в 06:30 UT и 12:30 UT. Полуденный провал на кривых, построенных по данным модели, не так глубок, как на экспериментальных кривых: 20 марта температура снижалась на 200 К, а 26 сентября – на 350 К. Экспериментальные и модельные значения температур ионов в эти дни, как и в дни солнцестояний, хорошо согласовывались.

5. Обсуждение

В упомянутой ранее работе [5] проводился анализ экспериментальных данных, полученных в период минимума солнечной активности, когда средний индекс солнечной активности $F_{10.7}$ составлял приблизительно 70. В период роста сол-

нечной активности среднее значение $F_{10.7}$ было почти в два раза больше, приблизительно 130. Рассмотрим изменения, произошедшие в ионосфере в связи с этим.

В дни летнего и зимнего солнцестояний общий характер поведения температур для фаз минимума и роста солнечной активности был схож. Хорошо просматривались эффекты, образовавшиеся за счет взаимодействия с магнитосопряженной областью ионосферы. Так, в дни зимнего солнцестояния наблюдался рост температуры электронов за несколько часов до местного восхода Солнца и плавный спад после захода. А в дни летнего солнцестояния наблюдалась задержка прогрева ионосферы до восхода Солнца в магнитосопряженной области и резкий спад температуры электронов после захода Солнца в магнитосопряженной области. Средние значения температуры электронов на фазе роста солнечной активности увеличились относительно средних значений в период минимума солнечной активности на 150 К в ночное время суток и на 300 К в полуденные часы. Значения температуры ионов на фазе роста солнечной активности были выше значений в период минимума солнечной активности примерно на 200 К на протяжении всех суток и в дни солнцестояний, и в дни равноденствий.

Особенно заметное различие между данными модели и эксперимента наблюдалось в дни равноденствий. Так, в минимуме солнечной активности не регистрировался полуденный провал температур электронов, который появился на фазе роста солнечной активности. Причиной такого однонаправленного переноса тепла может служить особый характер распределения источников нагрева и стоков тепла в системе ионосфера – плазмосфера [6]. Хорошо известно, что в областях ионосферы, лежащих выше 150 км, электронная компонента оказывается нагретой значительно сильнее, чем ионная или нейтральная. Сильный разогрев электронов обусловлен нагревом солнечным излучением, нагревом фотоэлектронов и высокой теплопроводностью электронов. Высокоэнергетические электроны теряют свое тепло при взаимодействии с ионами. Потери тепла всей плазмой в целом обусловлены передачей энергии от электронов к ионам.

Рассмотрим выражение для скорости передачи тепла [7]:

$$P_i = 7.7 \cdot 10^{-6} n_e n_i \frac{(T_e - T_i)}{A_i T_e^{3/2}},$$

где P_i – скорость передачи тепла, $\text{эВ} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$; n_e и n_i – концентрации электронов и ионов; A_i – масса ионов, а. е. м. Поскольку на рассматриваемых высотах ионосфера состоит преимущественно из ионов атомарного кислорода, скорость передачи тепла в ионосфере пропорциональна величине n_e^2 . Расчеты показали, что во время дневного уменьшения температуры электронов в дни весеннего и осеннего равноденствий $n_e = 5.2 \cdot 10^{11}$ и $5.4 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ соответственно, а в дни зимнего и летнего солнцестояний $n_e = 3.8 \cdot 10^{11}$ и $4.4 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ соответственно. Даже такие незначительные различия приводят к увеличению эффективности передачи тепла на 50 %, и, следовательно, к образованию полуденных провалов температуры электронов в дни равноденствий. Пороговым для проявления эффекта значением n_e , согласно нашим данным, является значение $n_e = 5.2 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$, наблюдавшееся 20 марта 2013 г. в момент, когда коэффициент $F_{10.7}$ превышал 110. Взаимодействие этих двух факторов – высокой концентрации электронов в ионосфере и превышающего определенный уровень коэффициента $F_{10.7}$ – и привело к образованию условий, благоприятных для образования полуденного провала температур электронов. Это предположение согласуется с выводами других авторов [6] и объясняет отсутствие эффекта полуденного провала в период минимума солнечной активности.

6. Выводы

1. С помощью радара НР Института ионосферы получены и изучены временные вариации температур ионов и электронов в дни весеннего и осеннего равноденствий и летнего и зимнего солнцестояний на фазе роста 24-го цикла солнечной активности. Подтверждено, что для адекватного описания процессов в ионосфере требуется системный подход, учитывающий, в частности, взаимодействие областей ионосферы, расположенных в магнитосопреженных областях.

2. Сравнение экспериментальных данных с данными модели IRI-2012 показало, что модель IRI-2012 завышает значения температур электронов и ионов для ночного времени суток и занижает их для дневного. Разница в температурах в ноч-

ное время составляла в среднем приблизительно 500 К, а в дневное – приблизительно 800 К.

3. Проанализирован эффект появления полуденного провала температуры электронов в дни весеннего и осеннего равноденствий, когда отмечался рост температур электронов и образование максимума в утреннее время, спад температуры на 200 и 350 К соответственно в полуденные часы и повторный рост с образованием вечернего максимума.

4. Оценено пороговое значение концентраций электронов, при котором возникает полуденный провал температур электронов. Оно оказалось равным $5.2 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$.

5. Отмеченные закономерности следует учитывать при коррекции модели ионосферы для Центрально-Европейского региона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черногор Л. Ф. Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. 1 // *Нелинейный мир*. – 2006. – Т. 4, № 12. – С. 655–697.
2. Черногор Л. Ф. Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. 2 // *Нелинейный мир*. – 2007. – Т. 5, № 4. – С. 198–231.
3. Эванс Дж. В. Теоретические и практические вопросы исследования ионосферы методом некогерентного рассеяния радиоволн // *ТИИЭР*. – 1969. – Т. 8, № 4. – С. 139–175.
4. Space Weather Prediction Center (2016). F10.7 cm Radio Emission. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.swpc.noaa.gov/phenomena/f107-cm-radioemissions>
5. Сюсюк М. Н., Котов Д. В., Черногор Л. Ф., Богомаз А. В. Вариации плазменных температур в ионосфере над Харьковом в течение глубокого минимума солнечной активности // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2016. – Т. 21, № 2. – С. 132–140.
6. Крипберг И. А., Тацилин А. В. Ионосфера и плазмаосфера. – М.: Наука, 1984. – 178 с.
7. Banks P. M. The thermal structure of the ionosphere // *Proc. IEEE*. – 1969. – Vol. 57, Is. 3. – P. 258–281. DOI: 10.1109/PROC.1969.6959

REFERENCES

1. CHERNOGOR, L. F., 2006. Earth–atmosphere–ionosphere–magnetosphere as an open dynamic nonlinear physical system (Part 1). *Nelinejnyj mir*. vol. 4, no. 12, pp. 655–697 (in Russian).
2. CHERNOGOR, L. F., 2007. Earth–atmosphere–ionosphere–magnetosphere as an open dynamic nonlinear physical system (Part 2). *Nelinejnyj mir*. vol. 5, no. 4, pp. 198–231 (in Russian).

3. EVANS, J. V., 1969. Theory and Practice of Ionospheric Study by Thomson Scatter Radar. *Proc. IEEE*. vol. 57, is. 4, pp. 496–530. DOI: 10.1109/PROC.1969.7005
4. SPACE WEATHER PREDICTION CENTER, 2016. *F10.7 cm Radio Emission* [online]. [viewed 27 August 2016]. Available from: <http://www.swpc.noaa.gov/phenomena/f107-cm-radioemissions>
5. SIUSIUK, M. N., KOTOV, D. V., CHERNOGOR, L. F. and BOGOMAZ, O.V., 2016. Variations of Plasma Temperatures in Ionosphere over Kharkiv During Extreme Solar Minimum. *Radio Physics and Radio Astronomy*. vol. 21, no. 2, pp. 132–140 (in Russian).
6. KRINBERG, I. A. and TASHILIN A. V., 1984. *Ionosphere and Plasmasphere*. Moscow: Nauka Publ. (in Russian).
7. BANKS, P. M., 1969. The thermal structure of the ionosphere. *Proc. IEEE*. vol. 57, is. 3, pp. 258–281. DOI: 10.1109/PROC.1969.6959

M. M. Siusiuk¹, D. V. Kotov², L. F. Chernogor³,
and O. V. Bogomaz²

¹National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”,
21, Kyrpychov St., Kharkiv, 61002, Ukraine

²Institute of Ionosphere, National Academy of Sciences
of Ukraine and Ministry of Education and Science of Ukraine,
16, Kyrpychov St., Kharkiv, 61002, Ukraine

³V. N. Karazin Kharkiv National University,
4, Svoboda Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

VARIATIONS OF PLASMA TEMPERATURES IN IONOSPHERE OVER KHARKIV IN THE SOLAR ACTIVITY GROWTH PHASE

Purpose: presenting temperature variations of electrons and ions obtained at the Institute of Ionosphere (Kharkiv) with an incoherent scatter radar in the growth phase of the 24th cycle of solar activity, and compare them with the corresponding data of IRI-2012 model.

Desing/methodology/approach: Data are obtained by incoherent scattering. Method of solving the inverse radiophysics problem was used for analysis. Two-dimensional ambiguity function was used for specification.

Findings: A significant difference has been found between experimental data and model data. So, for all days of observation, the model overestimated the night temperature values and underestimated them by day. The maximum difference is about 500 K at night and 800 K in the daytime. Also, the effects of appearance of midday collapse of electron temperature during the equinoxes are considered.

Conclusions: It is confirmed that to adequately describe the ionospheric processes it is necessary to use a systematic ap-

proach which takes into account, in particular, the interaction between ionospheric regions located in magneto-conjugate areas. Such regularities should be taken into account for correction of ionospheric model for the Central European region.

Key words: incoherent scattering radar, electron temperature, ion temperature, midday collapse, morning and evening peaks

M. M. Siusiuk¹, D. V. Kotov², L. F. Chernogor³,
O. V. Bogomaz²

¹Національний технічний університет
“Харківський політехнічний інститут”,
вул. Кирпичова, 21, м. Харків, 61002, Україна

²Інститут іоносфери НАН та МОН України,
вул. Кирпичова, 16, м. Харків, 61002, Україна

³Харківський національний університет
імені В. Н. Каразіна,
м. Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна

ВАРІАЦІЇ ТЕМПЕРАТУР ПЛАЗМИ В ІОНОСФЕРІ НАД ХАРКОВОМ НА ФАЗІ ЗРОСТАННЯ СОНЯЧНОЇ АКТИВНОСТІ

Предмет і мета роботи: надати варіації температур електронів та іонів, отриманих за допомогою радара некогерентного розсіяння Інституту іоносфери НАН та МОН України на фазі зростання 24-го циклу сонячної активності, а також порівняти їх з відповідними даними моделі іоносфери IRI-2012. *Методи і методологія:* Дані отримано методом некогерентного розсіяння, для їх аналізу використовувалися метод розв’язку оберненої радіофізичної задачі та уточнення за допомогою двовимірної функції невизначеності.

Результати: Виявлено значну розбіжність між даними експерименту та модельними даними. Так, для всіх днів спостережень, моделлю завишувались нічні значення температур і занижувались денні. Максимальні відмінності становили близько 500 К вночі й 800 К днем. Розглянуто ефекти виникнення полуденного провалу температур електронів у дні рівнодення.

Висновок: Підтверджено, що для адекватного опису процесів в іоносфері потрібен системний підхід, що враховує, зокрема, взаємодію областей іоносфери, розташованих в магнітоспряжених областях. Зазначені закономірності слід враховувати у корекції моделі іоносфери для Центрально-Європейського регіону.

Ключові слова: радар некогерентного розсіяння, температура електронів, температура іонів, полуденний провал, ранковий і вечірній максимуми

Статья поступила в редакцию 05.10.2016