

РАДИОФИЗИКА ГЕОКОСМОСАУДК 500.388, 520.16+
523.31+523.9:520.86PACS numbers: 93.30.Ge,
94.20.Cf, 94.20.Dm,
94.20.FgМ. Н. СЮСЮК¹, Д. В. КОТОВ², Л. Ф. ЧЕРНОГОР³,
А. В. БОГОМАЗ²¹ Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”,
ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, 61002, Украина
E-mail: syusyuk.marina@mail.ru² Институт ионосферы НАН и МОН Украины,
ул. Краснознаменная, 16, г. Харьков, 61002, Украина³ Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,
пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61022, Украина**ВАРИАЦИИ ПЛАЗМЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР В ИОНОСФЕРЕ
НАД ХАРЬКОВОМ В ТЕЧЕНИЕ ГЛУБОКОГО МИНИМУМА
СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ**

Цель работы: *представить вариации температур электронов и ионов, полученных с помощью радара некогерентного рассеяния Института ионосферы НАН и МОН Украины в период минимума 23-го цикла солнечной активности, а также сравнить полученные результаты 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, что модель IRI-2012 в большинстве случаев завышает значения температур электронов и ионов по сравнению с экспериментальными данными. Максимальные различия наблюдаются в ночное время и могут составлять около 500 К летом и 700 К зимой. Рассмотрены эффекты воздействия восходов и заходов Солнца в магнитосопряженной области.*

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

Ключевые слова: *метод некогерентного рассеяния, температура электронов, температура ионов, магнитосопряженная область*

1. Введение

Исследование высотно-временных вариаций температур электронов и ионов в ионосфере имеет важное фундаментальное и прикладное значение. Тепловые процессы в значительной степени определяют состояние и поведение системы Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера [1, 2].

В настоящее время существует ряд эмпирических моделей поведения температур электронов и ионов, среди них модели авторов: Эванс [3], Билитца и Хоэджи [4], Трухлик и др. [5]. До сих пор ни одна из моделей не позволяет адекват-

но представить глобальную картину вариаций температур. Причиной этого служит множество факторов, влияющих на значения температур (солнечная, магнитная активности и др.). Немаловажным также является способ получения экспериментальных данных. Следует отметить, что основной массив данных для формирования ныне существующих моделей ионосферы получен при помощи спутниковых измерений [5]. Существенные недостатки таких измерений описаны в работе [6]. Эти недостатки могут быть устранены применением радарного метода – метода некогерентного рассеяния (НР).

Значительный интерес представляет поведение плазменных температур во время глубокого и продолжительного минимума солнечной актив-

ности 2006–2010 гг. Стоит отметить особенности этого периода. 23-й солнечный цикл длился на протяжении 12.4 года (от 1996.4 до 2008.8), дольше, чем предыдущие солнечные циклы (22-й длился 9.7, а 21-й – 10.3 года). Этот солнечный цикл характеризовался также малым количеством солнечных пятен. В результате чего термосфера была менее прогретой и, следовательно, имела более низкую плотность, чем во время предыдущих минимумов [7, 8].

Цель настоящей работы – представить вариации температур электронов и ионов, полученные с помощью радара НР Института ионосферы НАН и МОН Украины в период минимума 23-го цикла солнечной активности, а также сравнить эти результаты с соответствующими данными модели ионосферы IRI-2012 (International Reference Ionosphere).

2. Состояние космической погоды

Выбранные для анализа данные соответствовали глубокому минимуму солнечной активности и началу выхода из него. На протяжении рассматриваемого периода индекс $F_{10.7}$ (определяющий плотность потока радиоизлучения Солнца на длине волны 10.7 см и измеряемый в единицах $10^{-22} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{Гц}^{-1}$) имел низкие значения. Так, для 4 июня 2008 г. индекс $F_{10.7}$ равнялся 65, для 23–24 сентября 2008 г. $F_{10.7} = 68$ и для 17 декабря 2008 г. $F_{10.7} = 69$. Для 23 июня, 21–22 сентября и 22 декабря 2010 г. индекс $F_{10.7}$ имел несколько большие значения: 74, 85 и 78 соответственно.

Геомагнитная обстановка в выбранные дни была спокойной. Планетарный индекс геомагнитной активности K_p не превышал значения 4, индекс A_p был не больше 6 (дни, когда $A_p < 30$, считаются магнитоспокойными).

3. Средства и методы

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.) [9].

Основные параметры радара следующие: несущая частота – 158 МГц, диаметр зенитной параболической антенны – 100 м, эффективная площадь антенны – 3700 м², коэффициент усиления антенны – 10⁴, ширина основного лепестка диаграммы направленности – около 1°, импуль-

сная и средняя мощности радиопередающего устройства достигают 3.6 МВт и 100 кВт соответственно, длительность излучаемого импульса $T_p \approx 650 \div 800$ мкс, частота следования импульсов $F = 24.4$ Гц. В режиме измерений ионного состава во внешней ионосфере полоса пропускания фильтра радиоприемного устройства составляет 9.5 кГц.

При измерениях параметров внешней ионосферы в рассматриваемый период использовалась длительность излучаемого импульса $T_p \approx 650$ мкс. Соответствующее высотное разрешение составляло около 100 км. Временное разрешение (интервал, на котором усреднялись измеренные автокорреляционные функции НР сигнала) равнялось 20 мин. Выбор такого интервала обоснован рядом факторов. Дальнейшее уменьшение временного разрешения приводит к недопустимому росту погрешности. А увеличение интервала усреднения данных может вызвать смещение получаемых оценок температур T_e , T_i и затруднить анализ быстрых процессов в ионосфере (например, сделать недоступными для наблюдений эффекты, связанные с влиянием магнито-сопряженной ионосферы). При анализе данных радара Института ионосферы использовались новые методические разработки, описанные в работах [10, 11].

4. Результаты наблюдений

Временные вариации температур электронов и ионов, наблюдавшиеся с помощью радара Института ионосферы, для выбранных дат представлены на рис. 1. Рассмотрим основные особенности вариаций.

Для всех сезонов доступный для наблюдений высотный диапазон был достаточно ограниченным (300 ÷ 450 км) вследствие малых значений отношения сигнал/шум в условиях минимума солнечной активности. В этом диапазоне происходит незначительное увеличение температур электронов и ионов с ростом высоты, поэтому представлены временные вариации температур, соответствующие диапазону высот 350 ÷ 450 км (с центром вблизи 400 км). Для этого высотного диапазона значение статистической погрешности получаемых оценок температуры ионов в зависимости от условий составляет 5 ÷ 15 %, для температуры электронов – 1 ÷ 10 %. Оценки по-

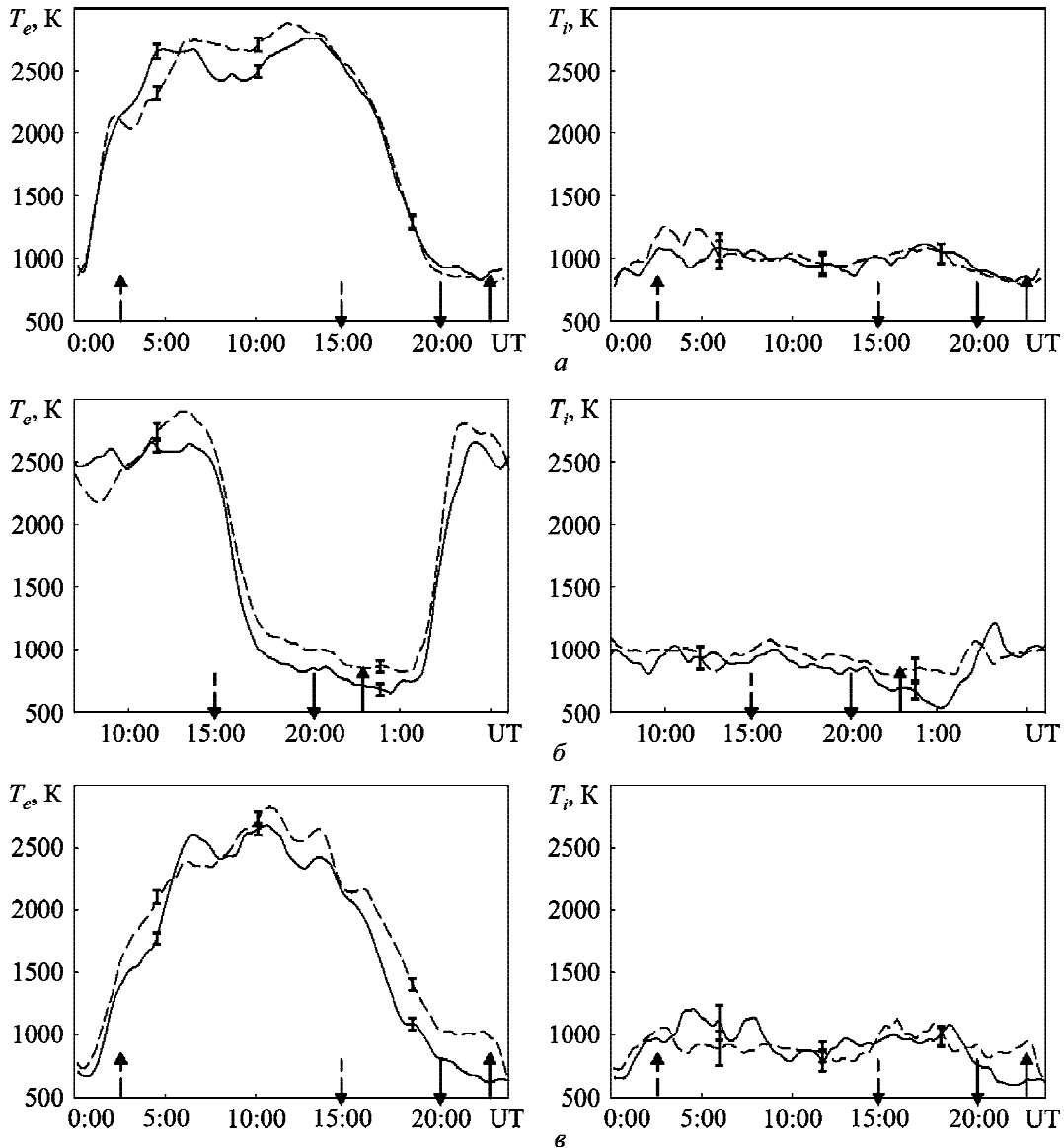


Рис. 1. Суточные вариации температур электронов и ионов: *a* – для лета (сплошная линия – экспериментальные данные, полученные 4 июня 2008 г., штриховая линия – экспериментальные данные, полученные 23 июня 2010 г.); *б* – для осени (сплошная линия – экспериментальные данные, полученные 23–24 сентября 2008 г., штриховая линия – экспериментальные данные, полученные 21–22 сентября 2010 г.); *в* – для зимы (сплошная линия – экспериментальные данные, полученные 17 декабря 2008 г., штриховая линия – экспериментальные данные, полученные 22 декабря 2010 г.). На этом и следующих рисунках сплошными стрелками показаны моменты восхода и захода Солнца на высоте 200 км над обсерваторией, штриховыми стрелками – соответствующие моменты в магнито-сопряженной области

грешностей получены путем статистического моделирования с использованием сигналов, имитирующих сигнал НР и шум, присутствующий при измерениях.

Для всех рассматриваемых дат отмечался значительный рост температуры электронов и относительно небольшой рост температуры ионов при восходе Солнца и их спад после захода Солнца.

Минимальные значения температур наблюдались в ночное время, когда температуры электронов и ионов становились равными друг другу. Во время летних измерений минимум температур наступал приблизительно в 23:30 UT и составлял $T_e = T_i = 800$ К как в 2008 г., так и в 2010 г. (рис. 1, *a*), во время осенних – приблизительно в 00:30 UT в 2008 г. ($T_e = T_i = 600$ К) и в 22:30 UT

в 2010 г. ($T_e = T_i = 800$ К) (рис. 1, б). Следует отметить, что заметное повышение минимальных температур 21 – 22 сентября 2010 г. связано с более высокой (примерно на 10 %) солнечной активностью в эти дни по сравнению с другими днями в этом году. Во время зимних измерений минимум наблюдался в 00:00 UT и составлял $T_e = T_i = 635$ К как в 2008 г., так и в 2010 г. (рис. 1, в).

Максимальные температуры электронов и ионов отмечались в полуденное время. Так, летом T_e достигала 2700 К в 2008 г. и 2900 К в 2010 г., осенью – 2600 К в 2008 г. и 2900 К в 2010 г., зимой – 2700 К и 2800 К в 2008 г. и 2010 г. соответственно. Суточные вариации температуры ионов имели плавный характер. Для всех сезонов максимальное значение T_i не превышало 1200 К. Суточные вариации температур для всех сезонов имели различный вид, так как в зимнее время ионосфера освещена слабее и не так долго, как летом. Таким образом, во время всего периода наблюдений летом и осенью ионосфера полностью прогревалась к 03:00 UT, а зимой только к 05:00 UT. Процесс остывания ионосферы зимой начинался раньше, примерно в 14:00 UT, осенью – примерно в 16:00 UT, а летом – еще на час позже.

5. Сравнение с данными модели IRI-2012

В последнее время в глобальную модель IRI были внесены изменения, направленные на ее улучшение посредством внедрения уточняющих коэффициентов, описывающих влияние солнечной активности на температуру электронов [12]. Основной массив данных для осуществления корректировки был получен при помощи ряда спутниковых измерений, направленных на изучение широтных зависимостей профилей температуры электронов, на протяжении всего года при трех уровнях солнечной активности (высокий, средний и низкий), на пяти высотах (350, 550, 850, 1400 и 2000 км), а также в ночное и дневное время. В частности, данные в период минимума солнечной активности на высотах ниже 750 км получены с помощью спутников “Интеркосмос-24” и “Интеркосмос-25” [10]. Результаты сравнительного анализа данных модели IRI-2012 и наших экспериментальных данных приведены на рис. 2 и рис. 3.

Для всех сезонов модель IRI-2012 дает значительно завышенные значения, по сравнению с ре-

зультатами радарных наблюдений, ночной температуры электронов. Например, 4 июня 2008 г. (рис. 2, а) минимальное значение температуры электронов наблюдалось в 22:30 UT и составило 780 К, модель для данного времени предоставляет значение 1050 К. Дневное поведение суточного хода экспериментальных данных хорошо согласуется с данными модели, особенно в полуденные часы. Минимальное значение ночной температуры ионов 4 июня 2008 г., полученное с помощью модели, превышает экспериментально измеренное примерно на 300 К. Для осени и зимы завышения температур в модели становятся более явными. Так, 23–24 сентября 2008 г. (рис. 2, б) минимальное значение температуры электронов наблюдалось в 00:30 UT и составило 600 К, тогда как модель предоставляет значение 1400 К. В полуденные часы в эти дни вновь наблюдается хорошее согласие между данными модели и эксперимента.

Для зимы 2008 г., 17 декабря, экспериментальное минимальное значение температуры электронов наблюдалось в 01:00 UT и составило 700 К, тогда как модель завышает это значение в два раза (рис. 2, в). Это различие медленно уменьшается, вплоть до 04:00 UT, когда температуры электронов, предоставленная моделью и полученная экспериментально, становятся более близкими ($\Delta T_e < 200$ К). После захода Солнца, примерно в 18:00 UT, разница между значениями T_e вновь начинает расти, пока около полночи не достигает 700 К. Аналогичным образом изменяются температуры ионов, в ночное время разность между модельными и экспериментальными значениями составляет 400 К.

Похожая ситуация наблюдалась при выходе из глубокого минимума солнечной активности в 2010 г. Например, 23 июня 2010 г. минимальное значение $T_e = 740$ К наблюдалось в 23:00 UT, согласно модели для данного времени $T_e = 1070$ К (рис. 3, а). В дневное время экспериментальные значения T_e превышают модельные в среднем на 300 К. При этом экспериментальные значения температуры электронов несколько увеличились по сравнению со значениями в период глубокого минимума солнечной активности в 2008 г., тогда как модельные, наоборот, уменьшились. Максимальные значения температуры электронов составили 2600 К и 2400 К в 2008 г. и 2010 г.

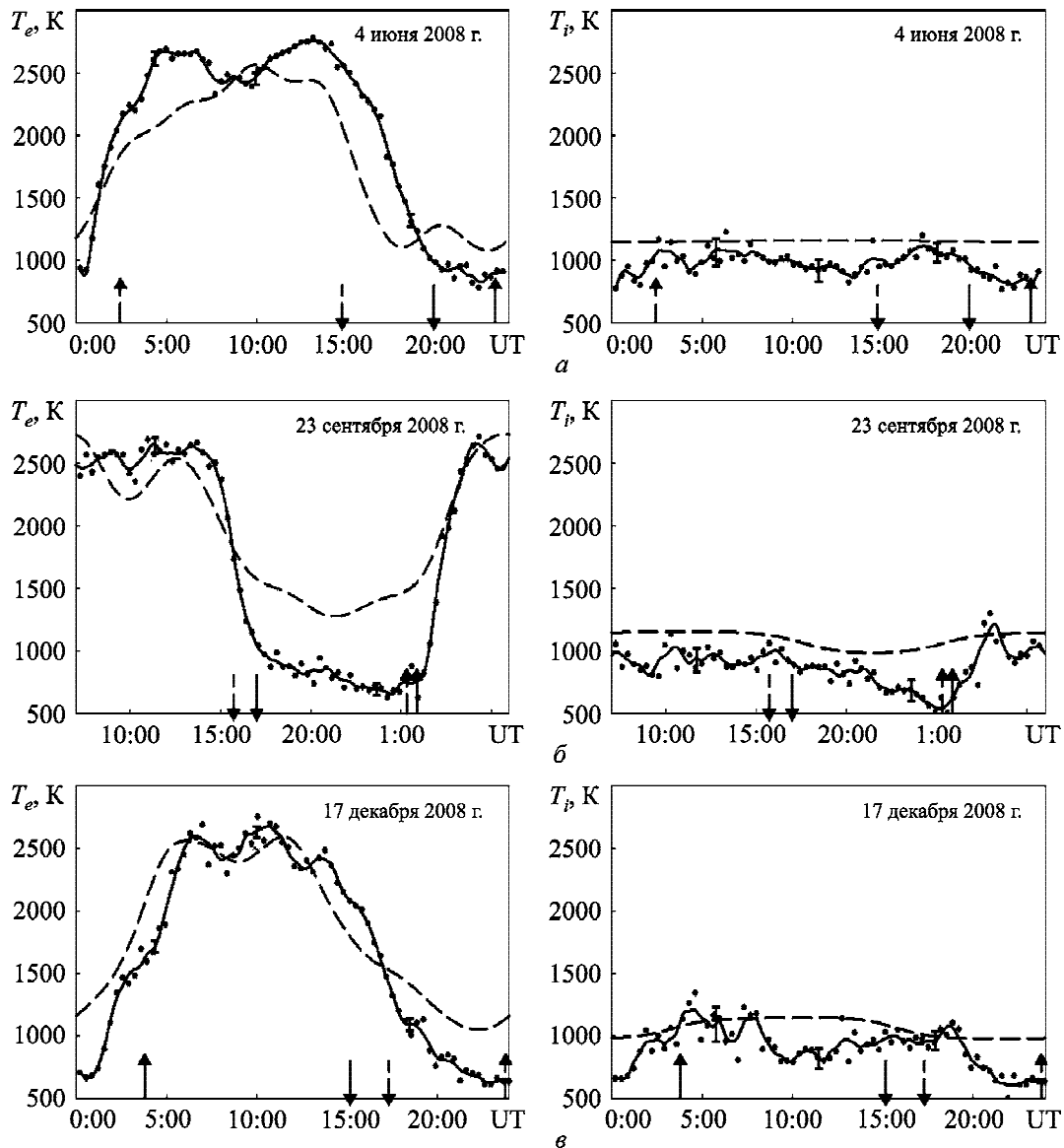


Рис. 2. Суточные вариации температур электронов и ионов в период минимума солнечной активности: *а* – 4 июня 2008 г.; *б* – 23 сентября 2008 г.; *в* – 17 декабря 2008 г. Точками обозначены дискретные экспериментальные оценки температур, сплошной линией показаны усредненные экспериментальные данные, штриховой линией – данные модели IRI-2012

соответственно. Для вечернего времени модель завышает значения T_e примерно на 200 К. Значения температуры ионов завышаются моделью на протяжении всего времени суток, среднее значение $\Delta T_i \approx 200$ К.

Для осени 2010 г., 21 сентября, минимальное значение температуры электронов отмечалось в 22:30 UT и было равным примерно 800 К, тогда как согласно модели $T_e \approx 1300$ К (рис. 3, *б*). После 03:00 UT по данным эксперимента температура электронов возрастала, и примерно в 04:00 ее значение составляло около 2800 К,

тогда как по данным модели ее значение не превышает 2500 К.

Для зимы 2010 г., 22 декабря, минимальное значение температуры электронов отмечалось в 00:30 UT и составило 730 К (рис. 3, *в*). Модель для данного времени дает значение $T_e = 1150$ К. Дневные значения температур электронов, полученные с помощью модели и экспериментально, хорошо согласуются. Хорошее согласование отмечается также в вечернее время. Температура ионов завышается моделью на протяжении всего времени суток, среднее значение $\Delta T_i \approx 150$ К.

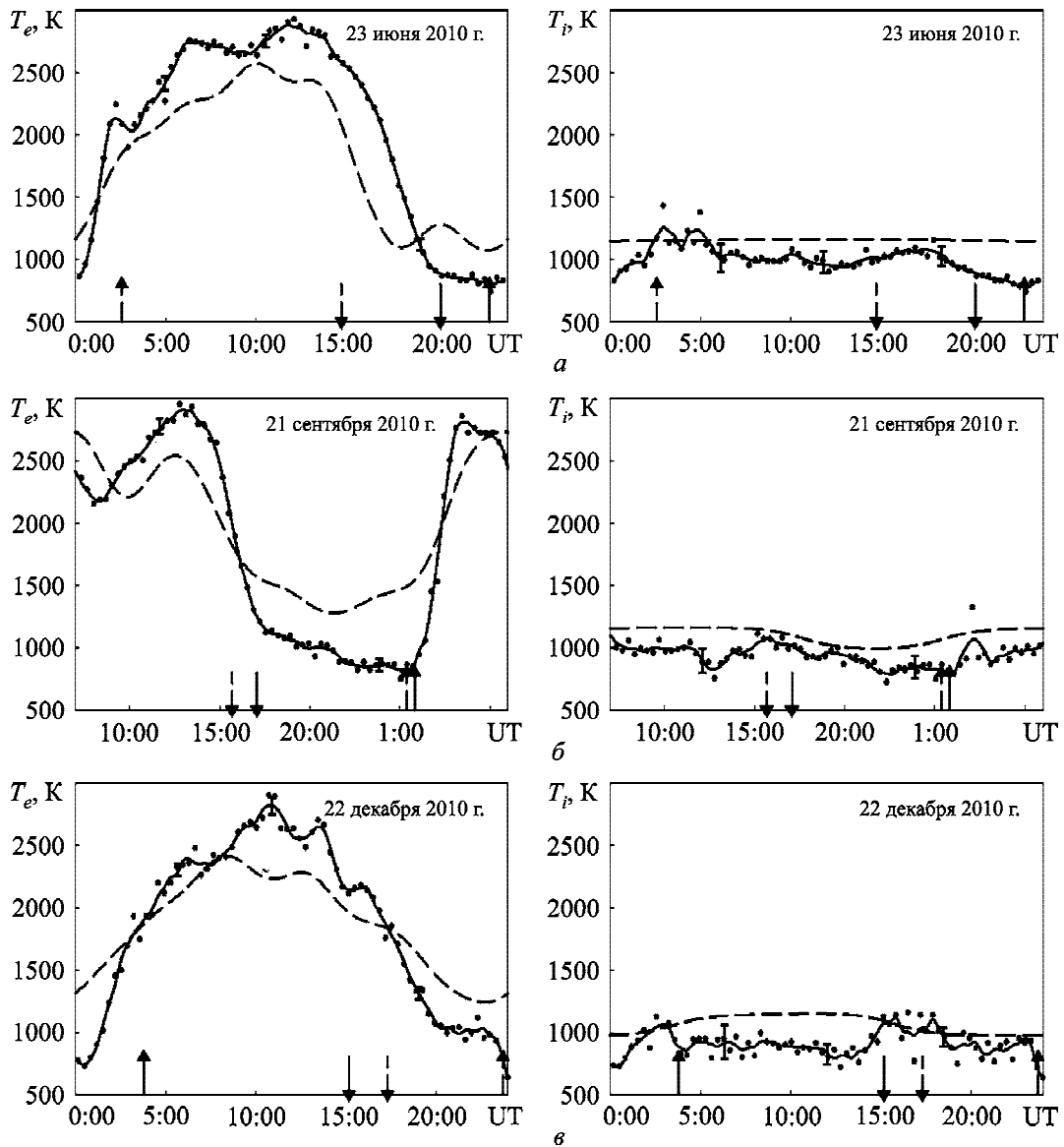


Рис. 3. Суточные вариации температур электронов и ионов в период роста солнечной активности: а – 23 июня 2010 г.; б – 21 сентября 2010 г.; в – 22 декабря 2010 г. Точками обозначены дискретные экспериментальные оценки температур, сплошной линией показаны усредненные экспериментальные данные, штриховой линией – данные модели IRI-2012

6. Обсуждение

Сравнение с данными модели IRI-2012. Отмеченные различия между данными, полученными на харьковском радаре НР, и данными модели IRI-2012 вызывают вопрос об их достоверности. Как было упомянуто выше, исходные данные для модели были получены с помощью спутников “Интеркосмос-24” и “Интеркосмос-25”. Ненадежность спутниковых измерений для изучения ионосферы уже давно дискутируется, поэтому при анализе экспериментальных данных мы обратились к работе авторов из обсерватории Аресибо

к работе авторов из обсерватории Аресибо (Пуэрто-Рико, 18°35' с. ш., 66°75' з. д.) [13]. В своей работе они опирались на результаты, полученные методом НР, как и в харьковской Ионосферной обсерватории. Оказалось, что ночные значения температур электронов и ионов, полученные на станции в Аресибо, хорошо согласуются с данными по нейтральной температуре T_n для их региона, рассчитанными с помощью модели NRLMSISE-00 [14]. Данные, полученные на радаре НР в Харькове, также хорошо согласуются с данными по T_n , полученными в модели

NRLMSISE-00 для нашего региона. Таким образом, можно предположить, что модель IRI-2012 не вполне корректно описывает поведение температур электронов и ионов для средних широт, в особенности для ночного времени.

Эффекты воздействия солнечного восхода и захода в магнито-сопряженной области. Одним из факторов, влияющих на значения температуры электронов, является перенос энергии фотоэлектронами из магнито-сопряженной области ионосферы [15, 16]. Для радара НР Института ионосферы такая область расположена в южном полушарии ($38^{\circ}70'$ ю. ш., $49^{\circ}86'$ в. д.), что приблизительно на 15° восточнее. Подобная особенность размещения приводит к тому, что восход Солнца над магнито-сопряженной областью существенно опережает местный восход Солнца. Так, в декабре 2008 г. и 2010 г. восход Солнца в магнито-сопряженной области опережал местный восход Солнца приблизительно на 4 ч, а заход Солнца запаздывал примерно на 3 ч. Благодаря столь значительному разнесению во времени в экспериментальных данных хорошо видны эффекты дополнительного нагрева ионосферы над Харьковом за счет влияния нагрева ионосферы в магнито-сопряженной области (см. рис. 3) [17]. Рассмотрим их подробнее.

Более наглядно эффекты видны в данных зимних экспериментов (см. рис. 2, в и рис. 3, в). При восходе Солнца в магнито-сопряженной области происходило быстрое возрастание T_e , за которым по мере нарастания сопротивления движению фотоэлектронов в магнитной силовой трубке следовала пауза (см. рис. 2, в) или спад (см. рис. 3, в), а затем новый подъем T_e при местном восходе Солнца. В течение дневного времени изменения температуры и концентрации электронов происходили в противофазе, поскольку с ростом электронной концентрации возрастала скорость передачи тепла от электронов к ионам и температура T_e снижалась. В вечернее время даже через $4 \div 4.5$ ч после местного захода Солнца наблюдался плавный спад температуры электронов, и только после захода Солнца в магнито-сопряженной области наступал тепловой баланс.

Летом на высотах выше 350 км над радаром НР в Харькове Солнце не заходило, и отмечались следующие ионосферные эффекты. После значительного увеличения T_e при местном восходе Сол-

нца следовало замедление роста температуры (см. рис. 2, а) либо спад (см. рис. 3, а) в связи с ростом электронной концентрации и потерь тепла за счет теплопроводности, а затем происходило новое нарастание T_e при восходе Солнца в магнито-сопряженной области. Днем в летнее и зимнее время поведение температуры электронов аналогичное. Летом, независимо от уровня солнечной активности, после местного захода Солнца тепловое равновесие наступало очень быстро, в течение одного часа.

Наименее заметным влияние солнечной активности в магнито-сопряженной области становилось осенью и весной, так как в это время Солнце одинаково влияет на ионосферу в обоих полушариях Земли.

7. Выводы

1. С помощью радара НР Института ионосферы получены и изучены временные вариации температур ионов и электронов для трех сезонов в период глубокого минимума 23-го цикла солнечной активности. Подтверждено, что для адекватного описания процессов в ионосфере требуется системный подход, учитывающий, в частности, взаимодействие областей ионосферы, расположенных в магнито-сопряженных областях.

2. Сравнение экспериментальных данных с данными модели IRI-2012 показало, что модель IRI-2012 завышает значения температур электронов и ионов. Разница в температурах в ночное время суток составляет в среднем около 500 К, но в некоторых случаях она больше 700 К (увеличение в два раза).

3. Проанализирован эффект воздействия восходов и заходов Солнца в магнито-сопряженной области. Зимой наблюдается резкий рост температуры электронов еще до местного восхода Солнца и плавный спад после захода Солнца. Летом отмечается резкий подъем температуры электронов после местного восхода и замедление роста или спад температуры перед восходом в магнито-сопряженной точке. После местного захода Солнца независимо от уровня солнечной активности тепловое равновесие наступит в течение одного часа.

4. 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. 655–97.
2. Черногор Л. Ф. Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. 2 // Нелинейный мир. – 2007. – Т. 5, № 4. – С. 198–31.
3. Эванс Дж. В. Теоретические и практические вопросы исследования ионосферы методом некогерентного рассеяния радиоволн // ТИИЭР. – 1969. – Т. 8, № 4. – С. 139–175.
4. Bilitza D. and Hoegy W. R. Solar activity variations of ionospheric plasma temperatures // Adv. Space Res. – 1990. – Vol. 10, No. 8. – P. 81–90. DOI: 10.1016/0273-1177(90)90190-B
5. 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. DOI: 10.1016/S0273-1177(03)00040-1
6. Oyama K. Electron temperature measurements carried out by Japanese scientific satellites // Adv. Space Res. – 1991. – Vol. 11, No. 10. – P. 149–158. DOI: 10.1016/0273-1177(91)90337-J
7. Araujo-Pradere E. A., Redmon R., Fedrizzi M., Viereck R., and Fuller-Rowell T. J. Some Characteristics of the Ionospheric Behavior During the Solar Cycle 23–24 Minimum // Sol. Phys. – 2011. – Vol. 274, Is. 1. – P. 439–456. DOI: 10.1007/s11207-011-9728-3
8. Solomon S. C., Woods T. N., Didkovsky L. V., Emmert J. T., and Qian L. Anomalously low solar extreme ultraviolet irradiance and thermospheric density during solar minimum // Geophys. Res. Lett. – 2010. – Vol. 37. – id. L16103. DOI: 10.1029/2010GL044468
9. Таран В. И. Исследование ионосферы в естественном и искусственно возмущенном состояниях методом некогерентного рассеяния // Геомагнетизм и аэронавигация. – 2001. – Т. 41, № 5. – С. 659–666.
10. Домнин И. Ф., Котов Д. В., Черногор Л. Ф. Оптимизация определения параметров ионосферной плазмы методом некогерентного рассеяния // Нелинейный мир. – 2012. – Т. 10, № 6. – С. 380–386.
11. 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”. – 2011. – № 44. – С. 81–84.
12. Truhlik V., Bilitza D., and Triskova L. A new global empirical model of the electron temperature with the inclusion of the solar activity variations for IRI // Earth Planets Space. – 2012. – Vol. 64. – P. 531–543. DOI: 10.5047/eps.2011.10.016
13. Aponte N., Brum Ch. G. M., Sulzer M. P., and González 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 // J. Geophys. Res. Space Phys. – 2013. – Vol. 118. – P. 4465–4470. DOI: 10.1002/jgra.50416
14. Picone J. M., Hedin A. E., and Drob D. P. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues // J. Geophys. Res. Space Phys. – 2002. – Vol. 107, No. A12. – id. 1468. DOI: 10.1029/2002JA009430
15. Carlson H. C. Ionospheric Heating by Magnetic Conjugate-Point Photoelectron // J. Geophys. Res. Space Phys. – 1966. – Vol. 71, No. 1. – P. 195–199. DOI: 10.1029/JZ071i001p00195
16. Kakinami Y., Balan N., Liu J. Y., and Oyama K. Predawn ionospheric heating observed by Hinotori satellite // J. Geophys. Res. – 2010. – Vol. 115. – id. A01304. DOI: 10.1029/2009JA014334
17. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. – М.: Наука, 1988. – 528 с.

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. BILITZA, D. and HOEGY, W. R., 1990. Solar activity variations of ionospheric plasma temperatures. *Adv. Space Res.* vol. 10, no. 8, pp. 81–90. DOI: 10.1016/0273-1177(90)90190-B
5. TRISKOVA, L., TRUHLIK, V. and SMILAUER, J., 2003. An empirical model of ion composition in the outer ionosphere. *Adv. Space Res.* vol. 31, no. 3, pp. 653–663. DOI: 10.1016/S0273-1177(03)00040-1
6. OYAMA, K., 1991. Electron temperature measurements carried out by Japanese scientific satellites. *Adv. Space Res.* vol. 11, no. 10, pp. 149–158. DOI: 10.1016/0273-1177(91)90337-J
7. ARAUJO-PRADERE, E. A., REDMON, R., FEDRIZZI, M., VIERECK, R. and FULLER-ROWELL, T. J., 2011. Some Characteristics of the Ionospheric Behavior During the Solar Cycle 23–24 Minimum. *Sol. Phys.* vol. 274, is. 1, pp. 439–456. DOI: 10.1007/s11207-011-9728-3
8. SOLOMON, S. C., WOODS, T. N., DIDKOVSKY, L. V., EMMERT, J. T. and QIAN, L., 2010. Anomalously low solar extreme ultraviolet irradiance and thermospheric density during solar minimum. *Geophys. Res. Lett.* vol. 37, id. L16103. DOI: 10.1029/2010GL044468
9. TARAN, V. I., 2001. Study of the ionosphere in the natural and artificially excited states by method of incoherent scattering. *Geomagnetizm i aeronomija*. vol. 41, no. 5, pp. 659–666 (in Russian).
10. DOMNIN, I. F., KOTOV, D. V. and CHERNOGOR, L. F., 2012. Optimization of the ionospheric plasma parameters estimation using the incoherent scatter technique. *Nelinejnyj mir*. vol. 10, no. 6, pp. 380–386 (in Russian).

11. SIUSIUK, M. N., KOTOV, D. V. and BOGOMAZ, A. V., 2011. Modeling two-dimensional uncertainty function in incoherent scatter radar. *Vestnik Natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta*. no. 44, pp. 81–84 (in Russian).
12. TRUHLIK, V., BILITZA, D. and TRISKOVA, L., 2012. A new global empirical model of the electron temperature with the inclusion of the solar activity variations for IRI. *Earth Planets Space*. vol. 64, pp. 531–543. DOI: 10.5047/eps.2011.10.016
13. APONTE, N., BRUM, CH. G. M., SULZER, M. P. and GONZÁLEZ, S. A., 2013. 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. *J. Geophys. Res. Space Phys.* vol. 118, pp. 4465–4470. DOI: 10.1002/jgra.50416
14. PICONE, J. M., HEDIN, A. E. and DROB, D. P., 2002. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues. *J. Geophys. Res. Space Phys.* vol. 107, no. A12, id. 1468. DOI: 10.1029/2002JA009430
15. CARLSON, H. C., 1966. Ionospheric Heating by Magnetic Conjugate-Point Photoelectron. *J. Geophys. Res. Space Phys.* vol. 71, no. 1, pp. 195–199. DOI: 10.1029/JZ071i001p00195
16. KAKINAMI, Y., BALAN, N., LIU, J. Y. and OYAMA, K., 2010. Predawn ionospheric heating observed by Hinotori satellite. *J. Geophys. Res.* vol. 115, id. A01304. DOI: 10.1029/2009JA014334
17. BRYUNELLI, B. E. and NAMGALADZE, A. A., 1987. Physics of the ionosphere. Moscow: Nauka Publ. (in Russian).

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

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

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

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

VARIATIONS OF PLASMA TEMPERATURES IN IONOSPHERE OVER KHARKIV DURING EXTREME SOLAR MINIMUM

Purpose: to present temperature variations of electrons and ions obtained at the Institute of Ionosphere (Kharkiv) with an incoherent scatter radar during the 23rd solar cycle minimum, and compare the obtained results with the corresponding data of IRI-2012 model.

Design/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: It has been found that in most cases the IRI-2012 model overestimates the values of electron and ion temperatures as against experimental data. The maximum differences are observed at night and can be about 500 K in summer, and 700 K in winter. Also, the effects of sunrise and sunset in magneto-conjugate area are considered.

Conclusions: It is confirmed that to adequately describe processes in the ionosphere it is necessary to have a systematic approach which takes into account interaction in ionospheric regions located in magneto-conjugate area. Such regularities must be taken into account for correction of ionospheric model for the Central European region.

Key words: method of incoherent scattering, electron temperature, ion temperature, magneto-conjugate area

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

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

²Інститут іоносфери НАН та МОН України,
вул. Червонопрапорна, 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 ПІД ЧАС ГЛИБОКОГО МІНІМУМУ СОНЯЧНОЇ АКТИВНОСТІ

Мета роботи: надати варіації температур електронів та іонів, отриманих за допомогою радара некогерентного розсіювання Інституту іоносфери НАН та МОН України в період мінімуму 23-го циклу сонячної активності, а також порівняти отримані результати з відповідними даними моделі іоносфери IRI-2012.

Методи і методологія: Дані отримано методом некогерентного розсіювання, для їх аналізу використовувались метод розв’язання оберненої радіофізичної задачі і уточнення за допомогою двовимірної функції невизначеності.

Результати: Виявлено, що модель IRI-2012 у більшості випадків завищує значення температур електронів та іонів порівняно з експериментальними даними. Максимальні відмінності спостерігаються в нічний час і можуть становити близько 500 К влітку і 700 К взимку. Розглянуто ефекти впливу сходу та заходу Сонця в магнітоспряженій області.

Висновок: Підтверджено, що для адекватного опису процесів в іоносфері потрібний 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: метод некогерентного розсіювання, температура електронів, температура іонів, магнітоспряжена область

Статья поступила в редакцию 22.02.2016