

СОПОСТАВЛЕНИЕ ДАННЫХ ХАРЬКОВСКОГО РАДАРА НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЙЯНИЯ С МЕЖДУНАРОДНОЙ СПРАВОЧНОЙ МОДЕЛЬЮ ИОНОСФЕРЫ IRI-2001

Дзюбанов Д. А., Лысенко В. Н., Таран В. И.

Институт ионосферы МОН и НАН Украины, Харьков

Сопоставляются полученные в Харькове данные об электронной концентрации и температурах заряженных частиц с новой редакцией международной справочной модели ионосферы IRI-2001. Показан пример применения модели IRI для вычисления погрешности определения параметров ионосферной плазмы при измерениях методом некогерентного рассеяния.

1. Введение

Метод некогерентного рассеяния (НР) в настоящее время получил признание в качестве наиболее информативного радиофизического метода исследования ионосферы. Он дает возможность определять в широком интервале высот электронную концентрацию N_e , ионную и электронную температуры (T_i и T_e), а также скорость дрейфа плазмы, ионный состав и другие параметры. Детальная информация о поведении этих параметров необходима для развития глобальных ионосферных и термосферных моделей.

Модель IRI-2001 [1] позволяет рассчитать большое количество ионосферных параметров для заданных географических или геомагнитных координат. От предыдущих версий (IRI-90, IRI-95) она отличается возможностью выбора различных частных моделей для представления отдельных характеристик ионосферной плазмы. Сравнение экспериментальных и модельных данных проводилось в два этапа. На первом этапе с помощью модели IRI оценивались погрешности измерения корреляционной функции (КФ) НР сигнала $R(h, \tau)$ на выходе измерительного канала и рассчитанных по КФ значений N_e , T_i и T_e . На втором этапе сравнивались экспериментальные и модельные данные.

2. ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ IRI ДЛЯ РАСЧЕТА ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИОНОСФЕРЫ РАДАРОМ НР И СОЗДАНИЯ НОВЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ НР СИГНАЛА

Температуры ионов и электронов методом НР определяются на дискретных высотах в результате аппроксимации (по минимуму СКО) измеренных КФ-НР сигнала с набором нормированных теоретических функций. Последние можно рассчитать по выражениям, полученным, например, в работе [2] для спектра тепловых флуктуаций электронной плотности. Спектральная функция зависит от температуры ионов, отношения электронной и ионной температур, ионного состава, частоты заполнения зондирующих радиоимпульсов. В зависимости от способа модуляции и длительности зондирующих

радиоимпульсов, изменения значений КФ в импульсном объеме и степени идеальности характеристик систем радара, НР-сигнал в большей или меньшей степени искажается в измерительном канале. Зададим КФ $R(\tau, h) = R(0, h)\rho_{TF}(\tau, T_i, T_e, \dots, h)$, где $\rho_{TF}(\tau, T_i, T_e, \dots, h)$ — коэффициент корреляции рассеивающей среды, $R(0, h) = \sigma(h)/h^2$, $\sigma(h)$ — высотная зависимость сечения рассеяния единичного рассеивающего объема, $R(0, h) = C N_e(h)/\{[1 + T_e(h)/T_i(h)] h^2\}$, C — константа радара. Также зададим характеристики устройств радара НР: $a(t)$ — характеристика восстановления антенного коммутатора; $b(t)$ — огибающая зондирующего радиоимпульса; $g(t)$ — импульсная характеристика измерительного канала; T_{SI} — длительность зондирующего радиоимпульса; t_s — длительность импульсной характеристики. Исходя из представления сигнала на входе приемного тракта радара в виде суммы шумоподобных радиоимпульсов, рассеянных с множества высот, расстояние между которыми превышает дебаевский радиус [3], получено выражение для КФ НР-сигнала на выходе измерительного канала при зондировании ионосферы одиночными радиоимпульсами:

$$\begin{aligned}
 R(t_a, \tau) = & \int_{c(t_a + \tau - T_{SI})/2}^{c t_a / 2} R(0, h) \int_{0 \cup (t_a - 2h/c - t_s)}^{t_a - 2h/c} a(y + 2h/c) b(y) g(t_a - y - 2h/c) \times \\
 & \times \int_{0 \cup (t_a - 2h/c + \tau - t_s)}^{t_a + \tau - 2h/c} \rho_{TF}(y - z, h_j) a(z + 2h/c) b(z) g(t_a + \tau - y - 2h/c) dz dy dh + \\
 & + \int_{c(t_a - T_{SI})/2}^{c(t_a + \tau - T_{SI})} R(0, h) \int_{0 \cup (t_a - 2h/c - t_s)}^{t_a - 2h/c} a(y + 2h/c) b(y) g(t_a - y - 2h/c) \times \\
 & \times \int_{0 \cup (t_a - 2h/c + \tau - t_s)}^{T_{SI}} \rho_{TF}(y - z, h_j) a(z + 2h/c) b(z) g(t_a + \tau - y - 2h/c) dz dy dh + \\
 & + \int_{h_{\min}}^{c(t_a - T_{SI})/2} R(0, h) \int_{0 \cup (t_a - 2h/c - t_s)}^{T_{SI}} a(y + 2h/c) b(y) g(t_a - y - 2h/c) \times \\
 & \times \int_{0 \cup (t_a - 2h/c + \tau - t_s)}^{T_{SI}} \rho_{TF}(y - z, h_j) a(z + 2h/c) b(z) g(t_a + \tau - y - 2h/c) dz dy dh. \quad (1)
 \end{aligned}$$

Здесь $t_a = 2h_a/c$, c — скорость света. Нижние пределы интегрирования в выражении (1), обозначенные как $0 \cup (t_a - 2h/c + \tau - t_s)$, показывают, что они равны 0, но при $t_a + \tau - t_s > 2h/c$ могут быть заменены выражением $(t_a - 2h/c + \tau - t_s)$. Выражение (1) и его разновидности применялись для моделирования измеренной КФ парных выборок и анализа погрешности измерения N_e , T_i и T_e . Пример расчета представлен на рис. 1. На рис. 1, а показаны исходные параметры ионосферы, полученные из модели IRI, на рис. 1, б —

рассчитанные по выражению (1) зависимости $R_s(h, \tau) = R(t_a, \tau)$, $\tau = \tau_k$ (k — номер сдвига КФ). На рис. 1, в приведены КФ НР-сигнала на фиксированных высотах, на рис. 1г и 1д — средняя квадратичная погрешность δg измерения КФ и относительные погрешности δT_i и δT_e определения ионной и электронной температур при использовании обычного [4] и модифицированного [5] методов трапецеидального высотного суммирования значений КФ. Второй метод учитывает изменение мощности НР-сигнала в импульсном объеме. Проведенные для различных условий расчеты показали, что в режиме излучения последовательности одиночных радиоимпульсов без внутриимпульсной модуляции радар НР обеспечивает точность, достаточную для сравнения результатов с моделью IRI 2001 в диапазоне высот 200–1500 км, а при использовании режима вдвоенных импульсов - в диапазоне высот 90–500 км.

3. Сопоставление экспериментальных модельных данных

В работе сопоставляются данные об F-области ионосферы, полученные в 1999 и 2001 г. в дни, определенные международным геофизическим календарем для радаров НР.

Сравнение результатов измерений электронной концентрации, ионной и электронной температур с модельными данными, за сутки 06.05.1999 г. (см. рис. 2 и таблицу) показало следующее.

Имеет место общее согласие временного хода ионосферных параметров, рассчитанных по модели и измеренных методом НР. Различия в электронной концентрации объясняются тем, что модель отражает усредненные значения ионосферных параметров, а измерения – реальную ситуацию. Тем не менее, и в модельных, и в экспериментальных зависимостях наблюдается взаимная связь вариаций электронной температуры с электронной концентрацией, т. е. уменьшение электронной температуры при увеличении электронной концентрации, вызванное ростом скорости передачи тепла тяжелым частицам. Но из экспериментальных данных следует, что рост и температуры и концентрации происходит интенсивнее после восхода Солнца на ионосферных высотах, поэтому и раньше прекращается рост T_e при увеличении электронной концентрации. Кроме того, видно, что, по-видимому, температура электронов поддерживается также и нагревом из магнитосопряженной точки (МСТ), так как после захода Солнца в МСТ наступает снижение T_e и в месте наблюдения. Что касается температуры ионов, то имеет место незначительное превышение дневных экспериментальных значений над модельными.

Анализируя зимнюю дату 14.02.2001 г. (рис. 3) можно видеть удивительно хорошее согласие суточных вариаций величины электронной концентрации в максимуме F-области. В то же время, если обратиться к данным по температурам электронов и ионов для этой же даты, то видно, что здесь наблюдаются существенные отличия. Это касается в первую очередь температуры электронов. Следует обратить внимание, что в реальной ситуации рост температуры электронов на ионосферных высотах начинается при-

мерно на 1.5 часа раньше, чем это следует из модели. Скорость нарастания электронной температура по данным наблюдений гораздо выше (примерно в 2.5 раза) и дальнейшее резкое нарастание электронной концентрации приводит к снижению скорости роста, а затем и к уменьшению электронной температуры.

Таким образом, уже в 9 часов, когда электронная концентрация достигает значения 10^{12} м^{-3} , по данным наблюдений видна четкая тенденция стремления электронной температуры к значениям ионной температуры за счет увеличивающейся теплопередачи. Небольшая (порядка 300 К) разница этих температур сохраняется вплоть до местного захода Солнца, который происходит примерно в 18 часов. В ночное время температура электронов практически совпадает с температурой ионов, в то время как согласно модели эти температуры различаются примерно на 250 К. Суточный ход рассчитанной и наблюдаемой ионной температуры в целом неплохо согласуется, за исключением утренних часов, когда измеренные значения T_i могут превышать расчетные примерно на 200 К.

Весенняя дата 27.04.2001 г. (см. рис. 4) характеризуется также неплохим согласием суточного хода электронной концентрации в максимуме F-области. Однако так же, как и в предыдущем случае, наблюдаются существенные различия хода дневной температуры электронов. Рост электронной температуры, как по модели, так и по результатам наблюдений, начинается в одно и то же время, однако позже измеренные и рассчитанные температуры ведут себя по-разному. Сравнивая эту и предыдущую дату между собой, можно видеть, что модель дает начало утреннего роста температуры электронов во время местного восхода Солнца и совершенно не учитывает влияния магнитосопряженной точки. А поскольку в апреле местный восход уже несколько опережает восход Солнца в МСТ, то и данные модели лучше согласуются с наблюдениями. Кроме того, как и в предыдущем случае, дневные значения рассчитанной электронной температуры существенно превышают наблюдавшиеся значения. Что касается ионной температуры, то следует отметить два момента. Во-первых, очень хорошо согласуется наблюдающийся и рассчитанный временной ход, во-вторых, как наблюдаемые, так и модельные ночные значения T_e и T_i примерно равны друг другу.

Выводы

Результаты сопоставления данных, полученных в зимний, летний и переходный (весенний) периоды, позволяют сделать следующие выводы. Хорошо согласуются данные по электронной концентрации в максимуме F-области, поскольку в модели использованы большие многолетние массивы экспериментальных данных, полученных на мировой сети станций вертикального зондирования. Данные же по температурам заряженных частиц имеют отличия, касающиеся прежде всего температуры электронов. Сезонно-суточное поведение электронной температуры является характерным скорее для средних широт североамериканского региона, в том смысле, как оно отражает влияние нагрева местной ионосферы фотоэлектронами, приходящими из магнитосопряженной

точки (существенные различия T_e и T_i в ночное время, а также определяющее влияние местного восхода на начало роста T_e во все сезоны). Кроме того, также иным образом проявляется взаимосвязь вариаций температуры электронов и электронной концентрации в дневное время за счет изменяющейся передачи тепла тяжелым частицам.

Таким образом, приведенные результаты сопоставления экспериментальных и модельных значений говорят о целесообразности использования данных ИР, полученных в Харькове, для развития Международной модели ионосферы IRI в части описания вариаций ионосферных параметров средних широт европейского региона.

1. Bilitza D. International Reference Ionosphere 2000 // Radio Science.- 2001.- Vol. 36, № 2.- P. 261-275.
2. Swartz W. E. and Farley D. T. A theory of incoherent scattering of radio waves by a plasma. 5. The use of the Nyquist theorem in general quasi – equilibrium situations // J. Geophys. Res.- Vol. 84, 1979. - P. 1930-1932.
3. Лысенко В. Н. Динамические искажения некогерентно рассеянного сигнала // Ионосфера: Республ. межведомств. науч.-техн. сборник.- 1991.- Вып. 1.- С.102-110.
4. Holt J. M., Rhoda D. A., Tetenbaum D., van Eyken A.P. Optimal analysis of incoherent scatter radar data // Radio Science.- 1992.- Vol. 27, №3.- P. 435 - 447.
5. Лысенко В. Н. Измерение параметров ионосферы средствами корреляционной обработки некогерентно рассеянного сигнала // Радиофизика и электроника. – Сб. науч. тр.-Харьков: Ин-т радиофизики и электроники. НАН Украины.-2002. – Т. 7, № 1. – С. 82-88.

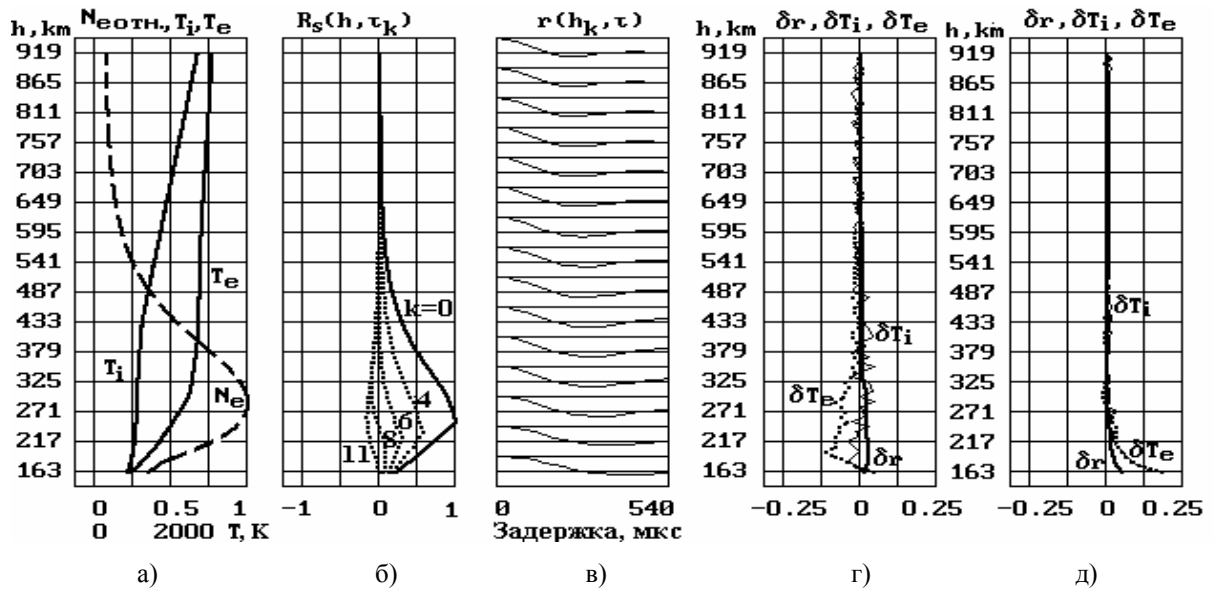
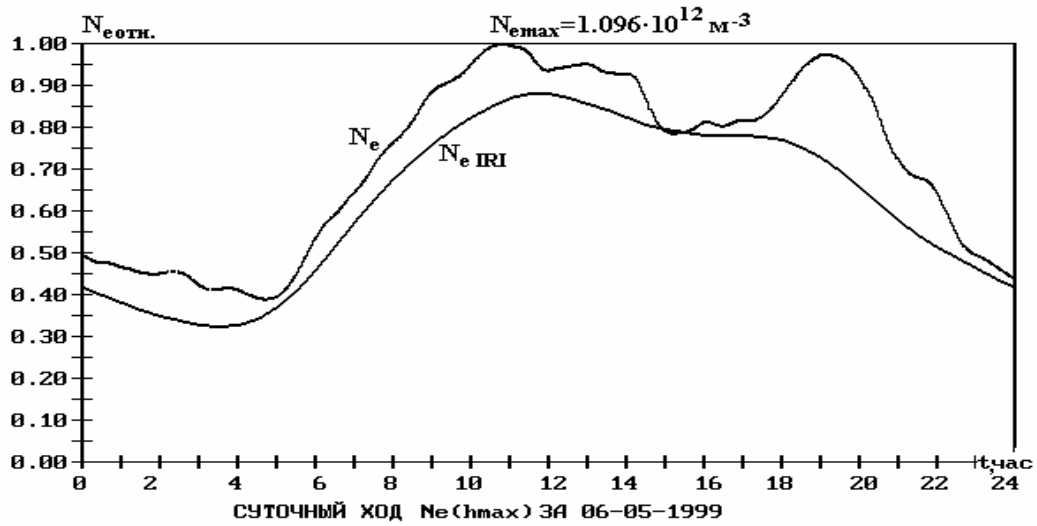


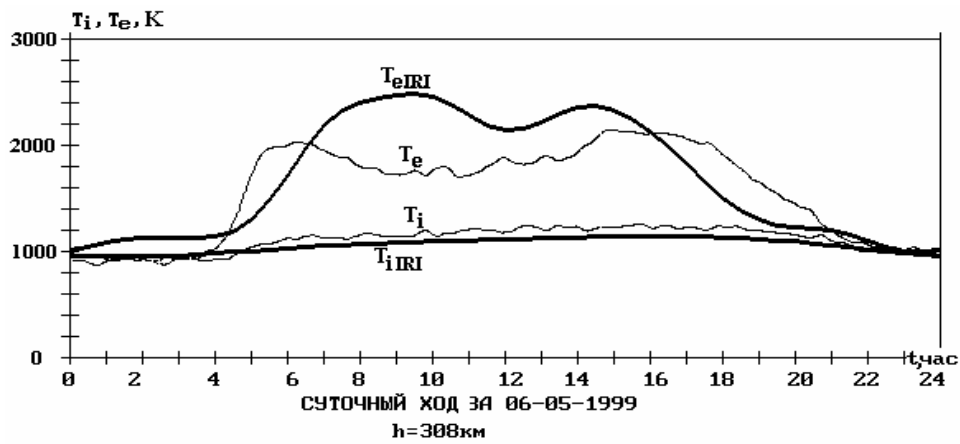
Рис.1. Моделирование измерения параметров ионосферы при задании высотных профилей $N_e(h)$, $T_e(h)$ и $T_i(h)$ согласно модели IRI

Относительная погрешность сравнения измеренных и модельных температур (к рис. 2)

| t, час. | 1 | 3 | 6 | 9 | 12 | 15 | 19 | 23 |
|--------------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|
| δT_i | -0,044 | -0,032 | 0,089 | 0,087 | 0,057 | 0,079 | 0,069 | -0,001 |
| δT_e | -0,14 | -0,171 | 0,165 | -0,3 | -0,123 | -0,079 | 0,28 | 0,015 |

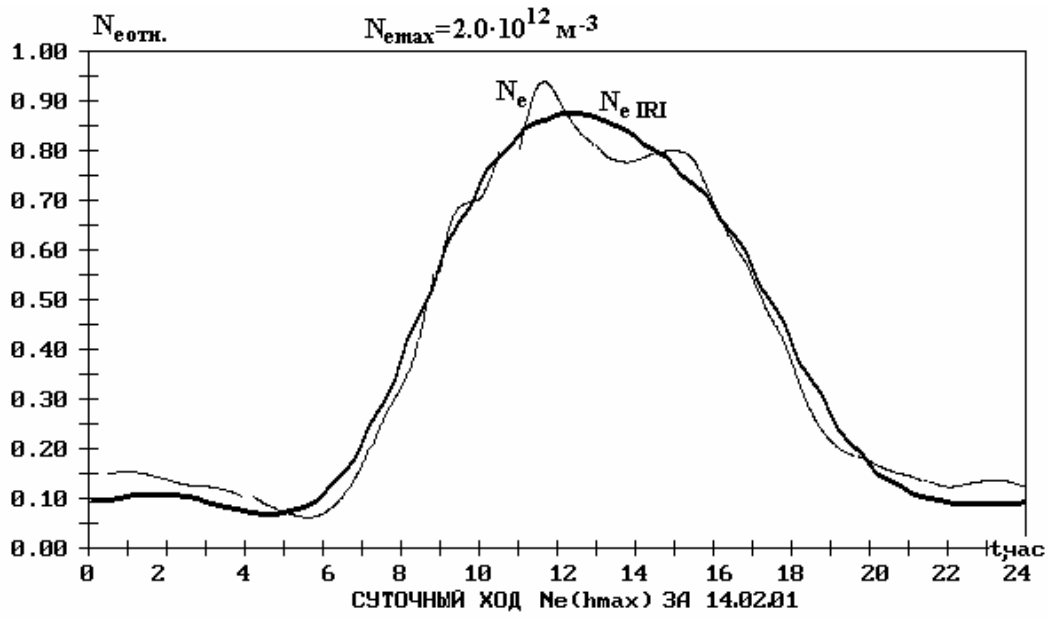


а)

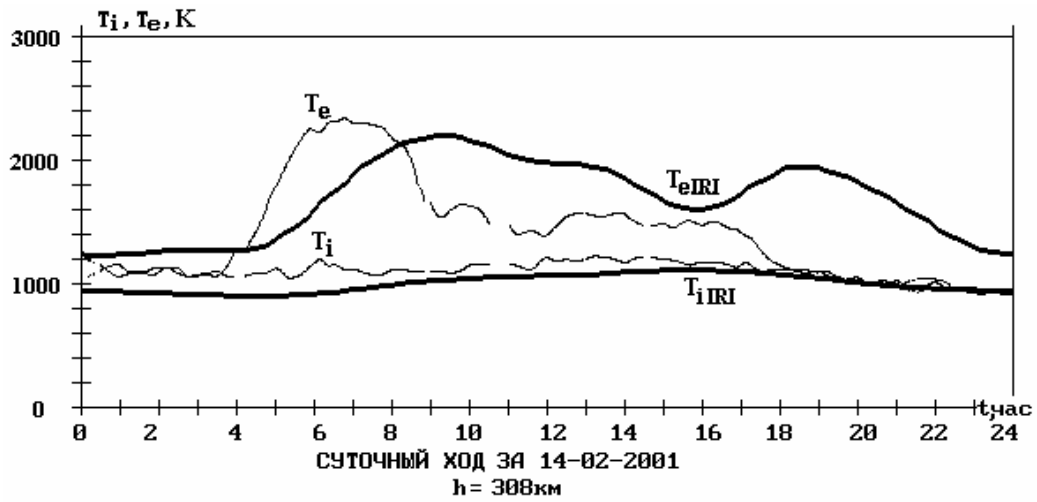


б)

Рис.2. Суточный ход экспериментальных (N_e , T_e и T_i) и модельных ($N_e IRI$, $T_e IRI$ и $T_i IRI$) параметров ионосферы за 06.05.1999 г.

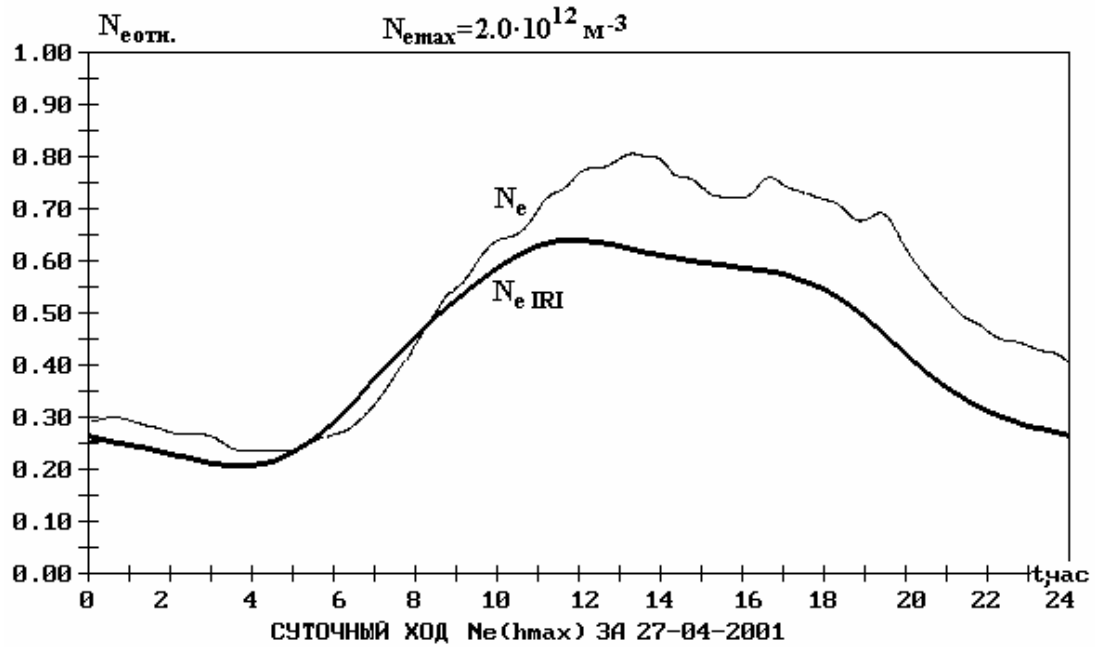


а)

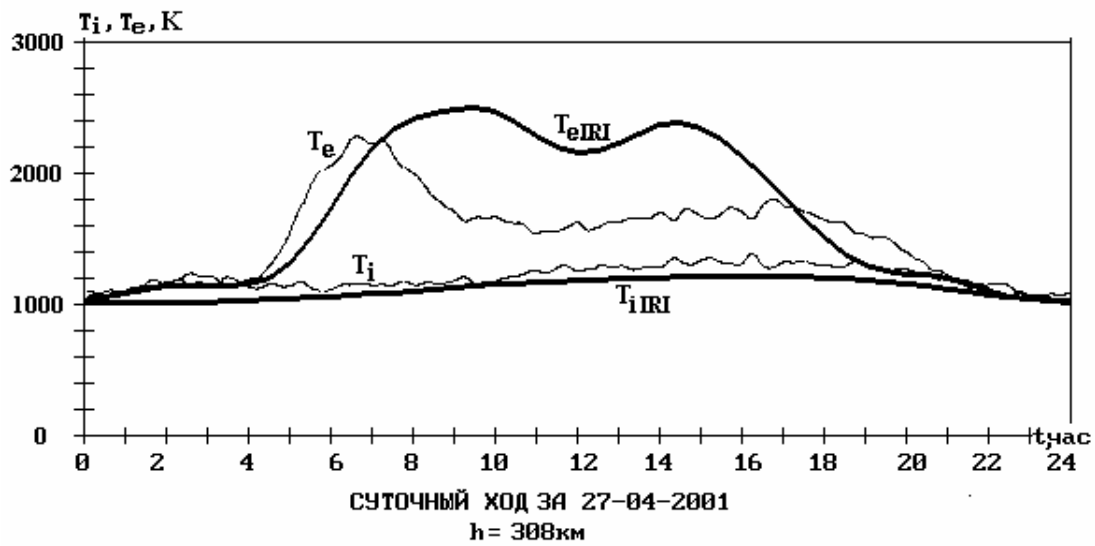


б)

Рис. 3. Суточный ход экспериментальных (N_e , T_e и T_i) и модельных ($N_e \text{ IRI}$, $T_e \text{ IRI}$ и $T_i \text{ IRI}$) параметров ионосферы за 14.02.2001 г.



а)



б)

Рис. 4. Суточный ход экспериментальных (N_e , T_e и T_i) и модельных ($N_{e\text{ IRI}}$, $T_{e\text{ IRI}}$ и $T_{i\text{ IRI}}$) параметров ионосферы за 27.04.2001 г.