

ОЦЕНКА ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ПЛАЗМОСФЕРЫ И ВЫСОТЫ ПЕРЕХОДА O^+/H^+ ПО ДАННЫМ ИРКУТСКОГО РАДАРА ИР И ПЭС GPS

Д.С. Хабитуев, Б.Г. Шпынев

ESTIMATION OF THE PLASMASPHERE ELECTRON DENSITY AND O^+/H^+ TRANSITION HEIGHT FROM IRKUTSK INCOHERENT SCATTER RADAR DATA AND GPS TOTAL ELECTRON CONTENT

D.S. Khabituev, B.G. Shpynev

В данной работе мы предлагаем методику расчета электронного содержания внешней ионосферы и плазмосферы, а также высоты перехода O^+/H^+ , которая основана на объединении экспериментальных данных Иркутского радара некогерентного рассеяния (ИРНР) и данных спутников GPS. В качестве модели внешней ионосферы используется модифицированный слой Чепмена, где высота перехода O^+/H^+ включена как параметр. По данной методике обработаны данные за период с 1998 по 2005 г. Проведены исследования сезонных и суточных вариаций высоты перехода O^+/H^+ в периоды различной геомагнитной активности. В работе показано, что электронное содержание плазмосферы может в отдельные дни достигать 50 % от полного электронного содержания и вклад плазмосферы может оказывать значительное влияние на вариации ПЭС GPS.

We suggest the method for calculating the outer ionosphere and plasmasphere electron content as well as. The method is based on combination of experimental data from Irkutsk Incoherent Scatter Radar and GPS. As a model of outer ionosphere, we used the modified Chapman layer in which O^+/H^+ transition height is included as a parameter. Using this method we processed 1998–2005 data. Seasonal and diurnal variations of O^+/H^+ transition height at different geomagnetic activities are examined. As shown, the plasmasphere electron content on some days can reach 50 % of total electron content (TEC), and the plasmasphere contribution can significantly influence TEC GPS variations.

Введение

В современном мире исследования динамики внешней ионосферы важны как с фундаментальной, так и с практической точки зрения. Для развития космонавтики и предсказания космической погоды необходимо создание теоретических и эмпирических моделей ионосферы, а также моделей взаимодействия внешней ионосферы с магнитосферой [Кринберг, Тащилин, 1984]. Существуют различные методики измерения электронной концентрации внешней ионосферы, такие как внешнее зондирование и прямые спутниковые измерения. Однако эти два метода не дают достаточно полного пространственно-временного разрешения получаемых данных, к тому же проведение таких экспериментов связано с определенными трудностями.

На сегодня наиболее информативные исследования позволяют проводить радары некогерентного рассеяния, основным преимуществом которых является способность получать высокое пространственное разрешение на всех высотах выше максимума слоя F2 [Брюнелли, Намгаладзе, 1988]. Для оценки электронного содержания плазмосферы и высоты перехода O^+/H^+ одних данных некогерентного рассеяния недостаточно, поэтому в настоящей работе мы объединили экспериментальные данные Иркутского радара некогерентного рассеяния (ИРНР) со спутниковыми данными ПЭС GPS.

Методика

Чтобы оценить электронное содержание плазмосферы и его долю от ПЭС, мы рассчитываем разницу между ПЭС GPS и электронным содержанием в ионосфере, которое измеряется на ИРНР. Технические свойства и частотный диапазон (154–162 МГц) ИРНР позволяют проводить измерения фарадеевского вращения сигнала без абсолютной калибровки до высоты вблизи максимума слоя F2 [Shpynev,

2004]. Антенна ИРНР может передавать и принимать только сигналы с линейной поляризацией, поэтому сигнал ослабевает, когда поляризации волны и антенны перпендикулярны. Таким образом, зная количество точек затухания сигнала, можно однозначно определить электронное содержание от земли до высоты этого минимума, используя формулу

$$TEC_F = 0.91 \times (0.5 + n) \times \pi, \quad (1)$$

где n – это количество фарадеевских минимумов, начиная со второго, так как поляризация первого минимума равна $\pi/2$. Каждый фарадеевский «горб»

после первого минимума включает ~ 3.23 TECU. Точность TEC_F зависит от шумов и составляет порядка 0.5 TECU. Данные GPS мы берем из общедоступных в сети Интернет карт IONEX GPS, точность которых оценивается в 1 TECU.

В качестве модели внешней ионосферы мы используем модифицированный слой Чепмена, где высота перехода O^+/H^+ включена как параметр [Strangeways et al., 2009]. Высота перехода определяется как высота, на которой концентрации ионов кислорода и атомарного водорода равны. В нашем исследовании допускается существование небольшого высотного интервала $\rho \ll H_{O^+}$, внутри которого концентрация O^+ экспоненциально падает до нуля, а концентрация H^+ , наоборот, растет. Ниже ρ плазма состоит только из ионов атомарного кислорода, а выше ρ – только из H^+ .

Для O^+ мы используем вертикальную шкалу высот, которая может быть получена из профилей n_e ИРНР [Шпынев и др., 2010]. Водородная шкала высот отличается от кислородной массовым фактором $M=16$, если учесть присутствие ионов He^+ , то массовый фактор изменится и будет равен $M=12.31$. Если высоту максимума слоя F2 обозначить как h_m , то описанную модель ионосферы в логарифмических координатах можно представить в виде

$$\ln(N) = \begin{cases} \ln(N_m) - \left\{ 1 - \frac{h-h_m}{H_{O^+}} - \exp\left(-\frac{h-h_m}{H_{O^+}}\right) \right\}, & h \leq h_{T0} - \rho, \\ N_2 \left\{ 1 - \frac{h-(h_{T0} + \rho)}{H_{H^+}} \right\}, & h \geq h_{T0} + \rho, \\ N_1 \left(1 - \frac{h-(h_{T0} - \rho)}{2\rho} \right) + N_2 \left(\frac{h-(h_{T0} - \rho)}{2\rho} \right), & h_{T0} - \rho \leq h \leq h_{T0} + \rho, \end{cases} \quad (2)$$

$$H_{H^+} = MH_{O^+}. \quad (3)$$

На рис. 1 представлены основные обозначения, используемые в формулах (2)–(3), без учета переходной области ρ , а также три интервала высот, для которых используются разные методы расчета ПЭС.

На рис. 2 представлена схема переходной области ρ . В настоящей работе мы будем рассматривать модель с резкой границей перехода O^+/H^+ , т. е. будем считать, что $\rho=0$ и $h_T=h_{T0}$.

Конечная формула для расчета высоты перехода O^+/H^+ имеет вид

$$h_{T0} = \frac{1}{a} \ln \left(\frac{-a(TEC_{GPS} - TEC_F) - \exp(ah_F)}{\exp(b) M - 1} \right). \quad (5)$$

Эксперимент

По описанной методике были обработаны данные ИРНР совместно с данными GPS IONEX за 1998–2005 гг.

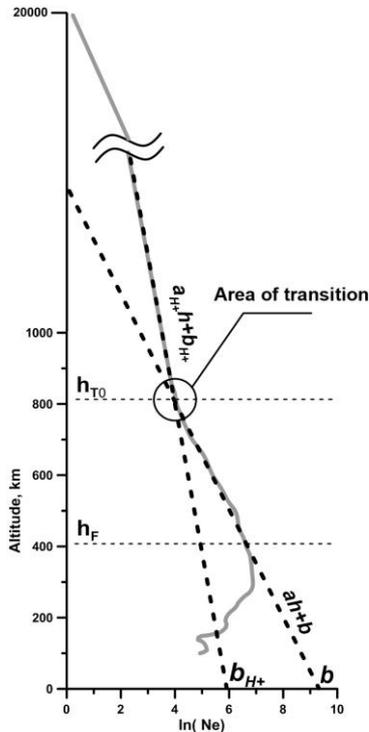


Рис. 1. Основные обозначения и схема расчета ПЭС.

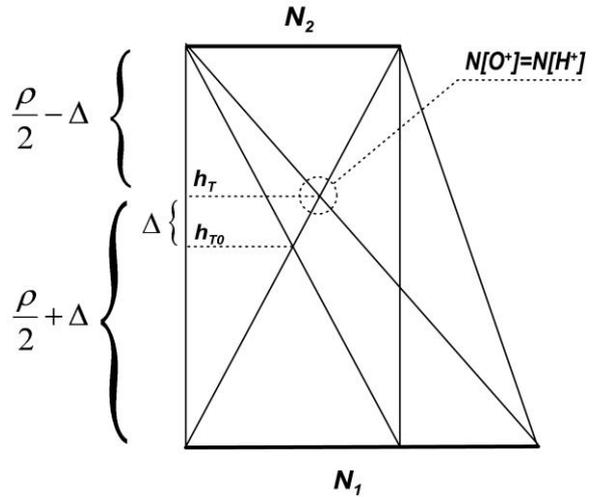


Рис. 2. Область перехода.

Этот период соответствует 23-му циклу солнечной активности. Были исследованы сезонная динамика высоты перехода O^+/H^+ , а также вариации, связанные с геомагнитной активностью. Проведена оценка относительного вклада плазмосферы в ПЭС, и получены абсолютные значения этих параметров.

Для демонстрации возможностей метода были проведены несколько экспериментов при различных геомагнитных условиях. На рис. 3 представлены характерные суточные вариации высоты перехода O^+/H^+ и относительного вклада плазмосферы в ПЭС за 16 и 17 марта 2000 г. ($A_p=30, 90$), в период, близкий к весеннему равноденствию. На верхнем графике видно, что h_T с восходом Солнца возрастает и в дневные часы не опускается ниже уровня ~ 900 км. На нижнем графике представлен относительный вклад плазмосферы в ПЭС, он составляет не более 10% в дневное время.

Рассмотрим теперь рис. 4, на котором приведены аналогичные зависимости в зимний период 12–13 декабря 2000 г. ($A_p=107, 90$). Здесь мы также можем видеть, что вклад плазмосферы значителен, не считая 4–5 ч после восхода Солнца, когда $n_e(h)$ резко возрастает. Ночью вклад плазмосферы преобладает и составляет 40–70%, это объясняется тем, что ночью именно плазмосфера является источником ионизации. Высота перехода O^+/H^+ на ~ 200 км ниже весенних значений и достигает максимальных значений во время полудня, потом быстро падает до ночных значений. Такое поведение высоты перехода характерно для зимнего периода, когда световой день достаточно короткий, и ионизация прекращается почти сразу после захода Солнца.

Заключение

Данное исследование позволяет по-новому взглянуть на возможности метода некогерентного рассеяния в исследованиях внешней ионосферы и плазмосферы. Работа выполнена при поддержке грантов 11-05-00822-а и 12-05-31279-мол_а.

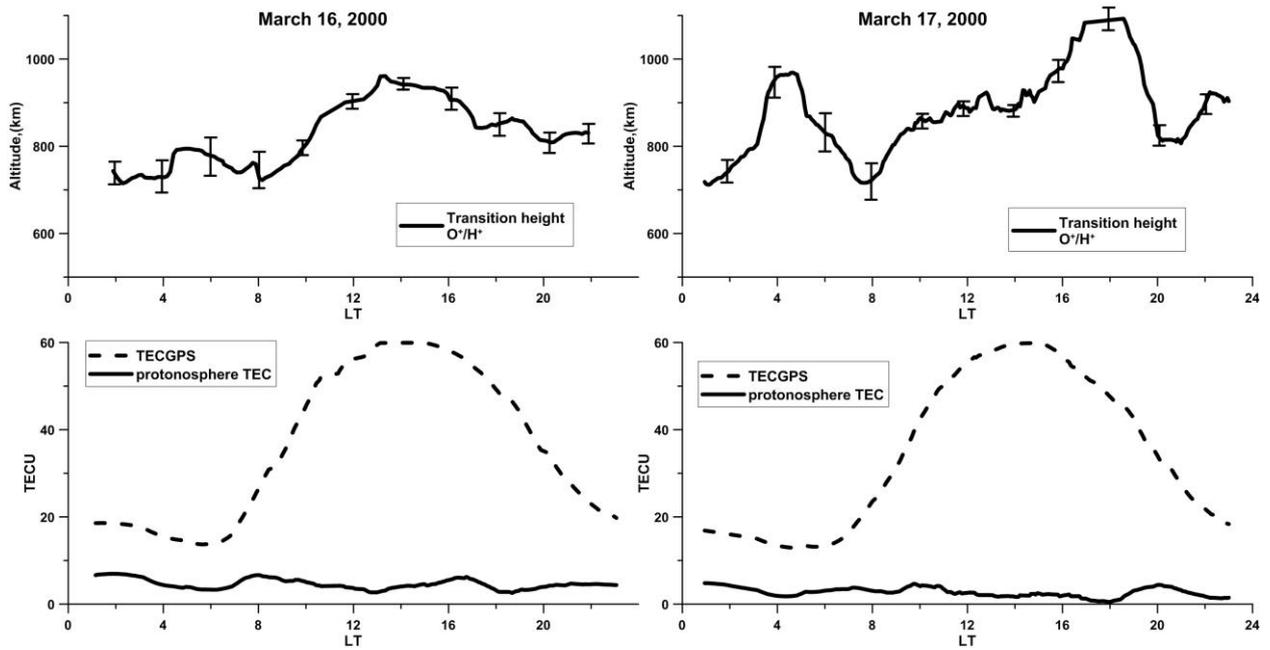


Рис. 3. Высота перехода O^+/H^+ (верхняя панель), ПЭС GPS и плазмосферы (нижняя панель) за 16–17 марта 2000 г.

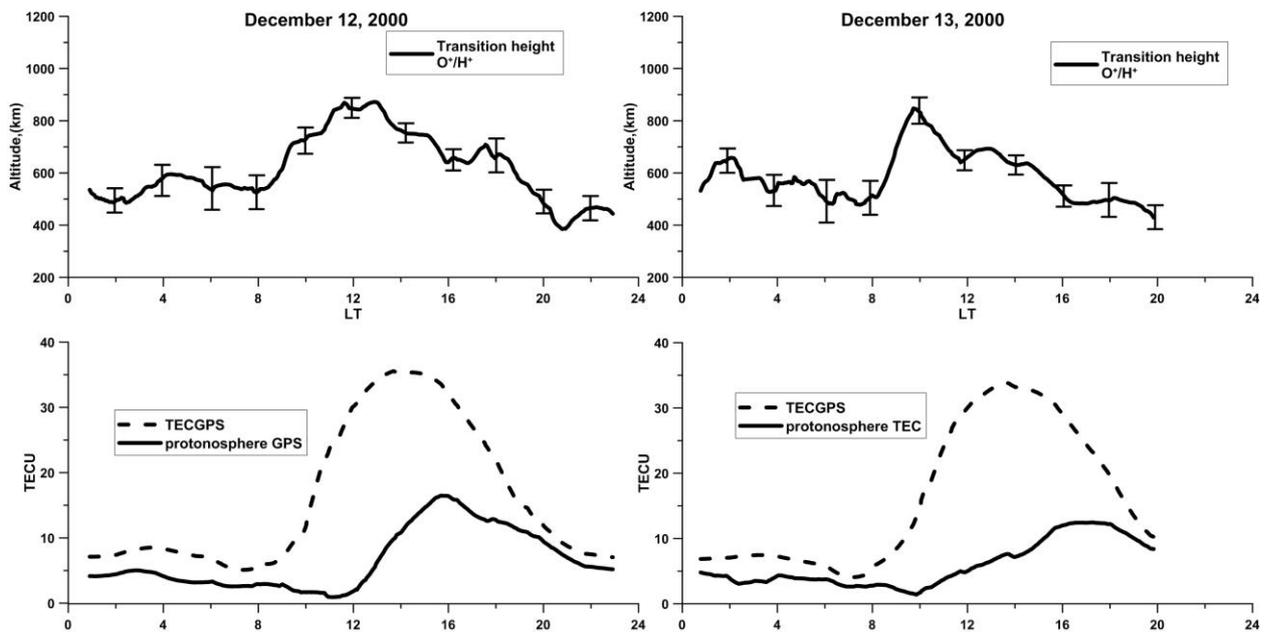


Рис. 4. То же, что на рис. 3, за 12–13 декабря 2000 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988. 526 с.
 Кринберг И.А., Тащилин А.В. Ионосфера и плазмосфера. М.: Наука, 1984. 189 с.
 Шпынев Б.Г., Жеребцов Г.А., Тащилин А.В. и др. Анализ состояния среднеширотной внешней ионосферы по данным измерений на Иркутском радаре HP // Солнечно-земная физика. 2010. Вып. 16. С. 15–20.

Shpynev B.G. Incoherent scatter Faraday rotation measurements on a radar with single linear polarization // Radio Sci. 2004. V. 39, N 3. RS3001. doi:10.1029/2001RS002523.
 Strangeways H.J., Kutiev I., Cander L.R., et al. Near-Earth space plasma modeling and forecasting // Annals of geophysics. 2009. V. 52, N 3/4. P. 255–271. doi:10.4401/ag-4579.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия