

УДК 550.388

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ВНЕШНЕЙ ИОНОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ И ПЭС GPS

Д.С. Хабитуев, Б.Г. Шпынев

ESTIMATED PARAMETERS OF THE TOPSIDE IONOSPHERE OBTAINED FROM IRKUTSK INCOHERENT SCATTER RADAR AND UTEC GPS DATA

D.S. Habituев, B.G. Shpynev

Данные Иркутского радара некогерентного рассеяния, полученные с использованием эффекта Фарадея, совместно с данными полного электронного содержания приемников GPS используются для оценки содержания электронов в протоносфере. Относительный вклад электронов протоносферы в полное электронное содержание может составлять более 30 %. На основе модели простого слоя и предположения о локальном постоянстве шкалы высот внешней ионосферы средних широт разработана методика расчета высоты перехода O^+/H^+ .

Введение

Данные фарадеевского вращения, полученные на Иркутском радаре некогерентного рассеяния, дают уникальную возможность точного измерения полного электронного содержания от поверхности Земли до точки полного замирания сигнала, которое происходит на конечном числе радиолокационных дальностей. Полное электронное содержание (ПЭС) до высоты орбиты (~20000 км) дают также приемники навигационной спутниковой системы GPS. Сравнение этих данных позволяет, во-первых, оценить относительный вклад протоносферы в общий ПЭС, а во-вторых, определить границу перехода O^+/H^+ , используя традиционную модель простого слоя, хорошо описывающую состояние среднеширотной ионосферы. Поскольку чувствительность большинства радаров НР недостаточна для определения границы O^+/H^+ из данных прямых измерений, оценка этой величины косвенным методом является весьма полезной как для расчета профиля $n_e(h)$ во внешней ионосфере, так и для моделирования магнитосферных процессов. Проведенные расчеты показывают непротиворечивость получаемых результатов и возможность дальнейшего исследования на их основе динамики внешней ионосферы и протоносферы.

Методика расчета ПЭС

Алгоритм расчета абсолютных значений электронной концентрации методом НР по ионосферному эффекту Фарадея, реализованный на Иркутском радаре НР, описан в работе [Shpynev V.G., 2004]. Кроме определения абсолютных значений $n_e(h)$ метод позволяет получать набор высот с точным значением полного электронного содержания вдоль пути распространения радиоволны от земной поверхности до высот полного замирания сигнала h . Метод расчета эффективной шкалы высот по данным НР, реализованный в рамках диффузионного приближения с учетом движения плазмы вдоль геомагнитного поля, описан в работе [Шпынев Б.Г., 2010]. Второй тип данных, используемых в данной работе, это ПЭС по данным спутниковой системы GPS, дающий полное содержание электронов от поверхности Земли до высоты орбиты спутников GPS (~ 20000 км). Эти данные традиционно представлены в виде карт ПЭС формата IONEX (ссылка). Хотя относительно методик получения этих карт в научной литературе имеются критические замечания, на настоящий момент карты ПЭС IONEX являются единственным доступ-

ным источником информации о полном содержании электронов в ионосфере.

В качестве модели мы используем традиционное представление для внешней ионосферы, в форме простого слоя Чепмена, в котором вклад атомарного кислорода и атомарного водорода рассматривается в виде двух независимых распределений [Hal J. Strangeways et al., 2009] со шкалой высот, определяемой массой ионов.

На рис. 1 изображена схема расчета ПЭС, в которой выделено три интервала высот. На первом участке ПЭС определяется по данным ИРНР исходя из формулы

$$TEC_{ISR} = 0.901 \times (0.5 + n) \times \pi, \quad (1)$$

где величина n – число фарадеевских вариаций сигнала. Полное число минимумов определяется относительно первого минимума, фаза которого равна $\pi/2$, а высота лежит в пределах 180–300 км и всегда может быть точно определена. На втором участке $[h_1..h_T]$, где точность определения фарадеевских замираний неудовлетворительна, используется расчет ПЭС на основе экспериментально определенной шкалы высот атомарного кислорода. Эффективная шкала высот определяется путем линейной регрессии логарифмированного профиля $n_e(h)$ на высотах от максимума ионизации до 600 км:

$$\ln n_e \cong ah + b \quad (2)$$

На третьем участке $[h_T..h_{GPS}]$ ПЭС определяемая как разность $TEC - TEC_{ISR} - TEC_2$. Через TEC обозначено ПЭС по данным GPS, TEC_2 соответствует ПЭС, рассчитанному по шкале высот атомарного кислорода H_{O^+} .

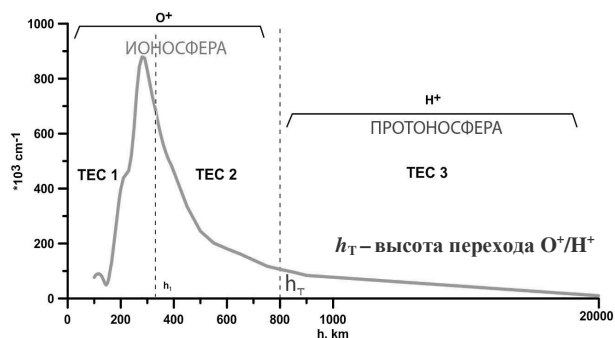


Рис. 1. Схема расчета вклада ПЭС.

Используя традиционную модель внешней ионосферы [Hal J. Strangeways et al., 2009], можно записать следующее соотношение для шкал высот:

$$H_{H^+} = 16H_{O^+} \quad (3)$$

Тогда формулы расчета ПЭС на участках 2 и 3 будут иметь вид:

$$TEC2 = H_{O^+} \times (\exp(-\frac{h_T}{H_{O^+}} + b) - \exp(-\frac{h_1}{H_{O^+}} + b)), \quad (4)$$

$$TEC3 = 16H_{O^+} \times \exp(-\frac{h_T}{16H_{O^+}} + b_{H^+}). \quad (5)$$

Из выражений (4) и (5) можно определить высоту перехода газового состава O^+/H^+ :

$$h_T = -H_{O^+} \ln \left(\frac{((TEC - TEC_{ISR} - TEC2) - \exp(ah_1))}{H_{O^+} \exp(b)} \cdot 15 \right). \quad (6)$$

Примеры расчета относительного вклада ионосферы и протоносферы приведены на рис. 2. Примеры расчета высоты перехода O^+/H^+ для разных сезонов в период высокой солнечной активности приведены на рис. 3. Расчеты показывают, что разница между ПЭС GPS и ПЭС ионосферы весьма существенна, и вклад протоносферы в ПЭС может составлять 30 % и более.

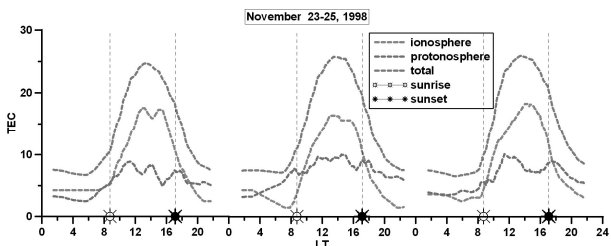


Рис. 2. Пример расчета вклада ПЭС по схеме, изображенной на рис. 1.

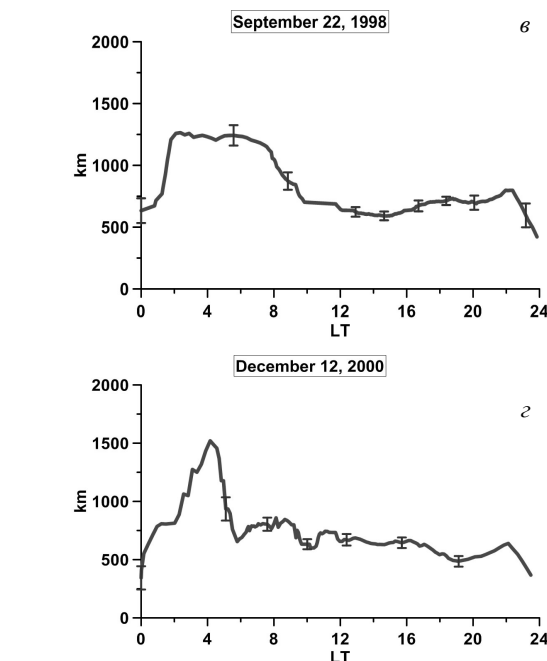
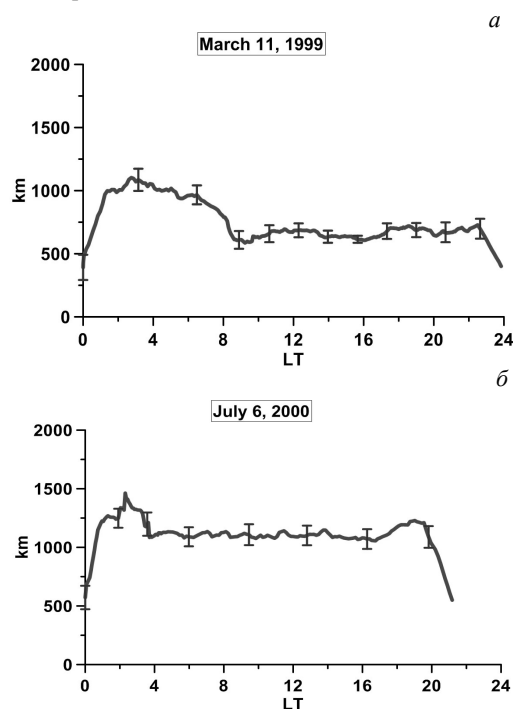


Рис. 3. Расчеты высоты перехода $O-H$ для разных сезонов года; весна (а); лето (б); осень (в); зима (г)

Высота границы перехода O^+/H^+ , получаемая в рамках данной методики, не противоречит теоретическим представлениям [Акасофу, Чепмен, 1974; Кринберг, Тащилин, 1984] для дневных часов во все рассматриваемые сезоны. Повышение этой высоты в ночное время не соответствует классической модели [Акасофу, Чепмен, 1974] и может быть следствием низкого уровня сигнала НР и методических погрешностей. Этот вопрос является предметом дальнейшего исследования.

Заключение

Проведенное исследование открывает новые возможности для исследования динамики внешней ионосферы и развития моделей ионосферно-магнитосферного взаимодействия. Вклад протоносферы в общее ПЭС значителен и должен учитываться при анализе динамики ионосферно-магнитосферного взаимодействия в моделях и реальных экспериментах.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №11-05-00822.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Акасофу С.-И., Чепмен С. Солнечно-земная физика // М.: Мир, 1974. С. 210–219.
 Кринберг И.А., Тащилин А.В. Ионосфера и плазма-сфера. М: Наука. 1984, 192 с.
 Шпынев Б.Г., Жеребцов Г.А., Тащилин А.В., Хабитуев Д.С., Щербаков А.А. Анализ состояния среднени-ротной внешней ионосферы по данным измерений на Иркутском радаре НР // Солнечно-земная физика. 2010. Вып. 16. С. 15–20.
 Hal J. Strangeways, Kutiev I., Ljiljana R. Cander Near-Earth space plasma modeling and forecasting. Ann. Geophys. 2009. V. 52, N 3/4. P. 255–271.
 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.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск