

## Вариации высоты перехода $O^+/H^+$ над восточной Сибирью по данным Иркутского радара HP и ПЭС GPS

Д.С. Хабитуев, Б.Г. Шпынев

*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия  
E-mail: Khabituiev@iszf.irk.ru*

В настоящей работе проводится исследование динамики параметров внешней ионосферы на основе разработанной методики расчета высоты перехода  $O^+/H^+$ , которая основана на объединении экспериментальных данных иркутского радара некогерентного рассеяния (ИРНР) и данных полного электронного содержания (ПЭС) системы GPS. В качестве модели внешней ионосферы используется модифицированный слой Чепмена, где высота перехода  $O^+/H^+$  включена как параметр. Отличительной чертой данной работы является введение в рассмотрение при моделировании профиля внешней ионосферы области перехода  $O^+/H^+$ , для которой используется своя шкала высот перехода  $H_T$ , что позволяет получить более реалистичные результаты при аппроксимации. В работе рассматриваются результаты, полученные по данной методике во время весеннего и осеннего равноденствия 2002 г. во время высокой солнечной активности. Проведены исследования суточного хода высоты перехода  $O^+/H^+$ , а также вклада электронного содержания плазмосферы в ПЭС в зависимости от изменения геомагнитной обстановки. 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. Вариации высоты перехода  $O^+/H^+$ , которые нельзя объяснить только изменением геомагнитной и солнечной активности, мы связываем с переносом плазмы, путем ее увлечения нейтральным термосферным ветром.

**Ключевые слова:** внешняя ионосфера, высота перехода  $O^+/H^+$ , ПЭС GPS.

### Введение

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 плазмосферой и магнитосферой. Для исследования ионосферы используются различные методы, и одним из самых информативных на сегодняшний день, является метод некогерентного рассеяния (НР). Этот метод позволяет проводить прямые измерения в большом диапазоне высот выше и ниже максимума слоя F2. Единственный в России радар такого типа находится в 125 км от Иркутска ( $53^\circ$  с.ш,  $103^\circ$  в.д.), измерения на котором ведутся с конца 90х годов. Иркутский радар некогерентного рассеяния (ИРНР) создан на базе бывшей радиолокационной установки «Днепр» (Жеребцов и др., 2002). На сегодняшний день на радаре проводятся измерения в течение  $\sim 30$ – $60$  дней в году, в рамках координированных измерений международной сети радаров HP (URSI ISWG) и во время специальных экспериментов. Проводимые измерения дают информацию о распределении электронной концентрации, ионной и электронной температурах плазмы на высотах 150–800 км.

Наименее исследованной областью внешней ионосферы (выше высоты главного максимума ионизации) является регион перехода газового состава от атомарного кислорода к атомарному водороду – основному компоненту плазмосферы. Проблема в том, что потенциал

большинства радаров НР не позволяет проводить измерения на высотах более 1000 км, а спутниковые исследования могут проводиться только прямыми методами и имеют низкое пространственно-временное разрешение. По этим причинам любые возможности получить информацию о параметрах границы перехода от ионосферы к плазмосфере являются востребованными в современных исследованиях околоземного космического пространства.

Одним из параметров, характеризующих внешнюю ионосферу, является высота перехода от преобладания ионов атомарного кислорода к преобладанию легких ионов  $H^+$  и  $He^+$ , на которой концентрации  $O^+$  и  $(H^+ + He^+)$  равны. На двух американских радарх Аре-сибо (Пуэрто-Рико) и Джикамарка (Перу), на которых возможны прямые измерения на высотах более 1000 км, было проведено большое количество экспериментов посвященных исследованию динамики высоты перехода в периоды различного состояния солнечной и геомагнитной активности (Gonzalez et al., 2004),(Heelis et al., 2009).

На Иркутском радаре НР, с помощью стандартной методики обработки, высоту перехода удастся определить в очень редких случаях в ночное время, когда граница перехода опускается ниже 600 км. В настоящей работе предлагается новая методика оценки высоты перехода  $O^+/H^+$  и шкалы высот плазмосферы, основанная на сочетании уникальных технических характеристик ИРНР и данных полного электронного содержания спутниковой системы GPS (ПЭС GPS). Полное электронное содержание в англоязычной литературе обозначается как TEC (Total Electron Content) и измеряется в единицах TECU ( $1TECU=10^{16} м^{-2}$ ).

## Метод

Основная идея методики заключается в объединении данных ИРНР и ПЭС GPS. Данные ИРНР полученные в стандартных экспериментах содержат информацию об электронной концентрации до высоты ~600-700 км. Разрешение по высоте и времени составляет 25 км и 2 мин соответственно. В качестве данных ПЭС GPS мы использовали общедоступные карты в формате IONEX (Mannucci et al., 1998).

Технические характеристики и частотный диапазон (154–162 МГц) Иркутского радара НР позволяют проводить измерения фарадеевского вращения сигнала без абсолютной калибровки до высот выше максимума слоя F2 (Shpynev, 2004). Эти измерения проводятся на основе эффекта Фарадея, приводящего к вращению плоскости поляризации радиоволны при распространении в замагниченной плазме. Угловая скорость вращения зависит от электронной концентрации вдоль пути распространения. Антенна иркутского радара может передавать и принимать только сигналы с одной линейной поляризацией, поэтому сигнал ослабевает, когда поляризация с волны и антенны перпендикулярны. Интегральная концен-

трация между соседними минимумами мощности сигнала является постоянной и известной величиной, поэтому зная количество минимумов можно однозначно определить электронное содержание от поверхности 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 с первого минимума, угол поляризации которого равен  $\pi/2$ .

Чтобы объединить данные ИРНР и ПЭС GPS необходима модель внешней ионосферы. В качестве такой модели мы используем модифицированный слой Чепмена, где высота перехода  $O^+/H^+$  включена как параметр (Strangeways et al., 2009). Основным принципом такой модели является экспоненциальное распределение каждой из компонент плазмы во внешней ионосфере с разной шкалой высот. В качестве шкалы высот атомарного кислорода  $H_{O^+}$ , мы будем использовать вертикальную шкалу высот, которая определяется из профиля электронной концентрации. Такая шкала высот зависит от температурного градиента, скорости диффузии, и ионно-нейтрального дрейфа, вызванного нейтральным ветром (Шпынев и др., 2010). При одинаковых условиях диффузионного равновесия в ионосферной плазме разница шкал высот будет определяться разницей масс ионов, т.е. некоторым массовым фактором, который для водорода будет равен  $M=16$ . В модели ионы гелия  $He^+$  считаются примесными, и мы оцениваем их вклад как не превышающий 10%. Для смеси, состоящей из 90%  $H^+$  и 10%  $He^+$ , шкала высот составит  $H_{H^++He^+} = 12,31 \cdot H_{O^+}$ . Далее для удобства будем считать, что  $H_{H^++He^+} = H_{H^+}$ .

Высота перехода  $O^+/H^+$  определяется как высота, на которой концентрации ионов кислорода и водорода равны  $n(O^+) = n(H^+)$ . Область перехода имеет определенные пространственные размеры, поэтому в модели необходимо рассматривать область смешанного ионного состава. Чтобы учесть размер области смешивания  $O^+/H^+/He^+$ , в модели необходимо ввести шкалу высот переходной области  $H_T$ , которая определяет коэффициент экспоненциального изменения  $O^+$  и  $H^+$ .

Модель внешней ионосферы, в однокомпонентном приближении, можно записать в виде простого слоя Чепмена:

$$n_0(h) = N_m \exp(1 - z - e^{-z}), \quad (2)$$

где  $N_m$  - концентрация в максимуме слоя F2,  $z = \frac{h - h_m}{H_{O^+}}$ ,  $h_m$  - высота максимума слоя. Для

учета структуры области перехода вблизи высоты перехода  $h_T$ , введем параметр  $z_T = \frac{h - h_T}{H_T}$ , и запишем модель распределения кислородной плазмы в виде:

$$n_{O^+}(h) = \begin{cases} n_0(h) - \frac{1}{2}n_0(h_T)e^{-z_T}; & h \leq h_T \\ n_0(h_T) \cdot \frac{1}{2}e^{-z_T}; & h > h_T \end{cases} \quad (3)$$

Подобным образом представим распределение ионов водорода:

$$n_{H^+}(h) = \begin{cases} n_0(h_T) \cdot \frac{1}{2}e^{-z_T}; & h \leq h_T \\ n_0(h_T) \cdot \left(1 - \frac{1}{2}e^{-z_T} - \exp\left(-\frac{h-h_T}{H_{H^+}}\right)\right); & h > h_T \end{cases} \quad (4)$$

В модели предполагается, что концентрации обеих компонент равны в точке  $h_T$ .

Выражение для суммарной концентрации запишется в виде:

$$n_{O^++H^+}(h) = \begin{cases} n_0(h); & h \leq h_T \\ n_0(h_T) \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{h-h_T}{H_{H^+}}\right)\right); & h > h_T \end{cases} \quad (5)$$

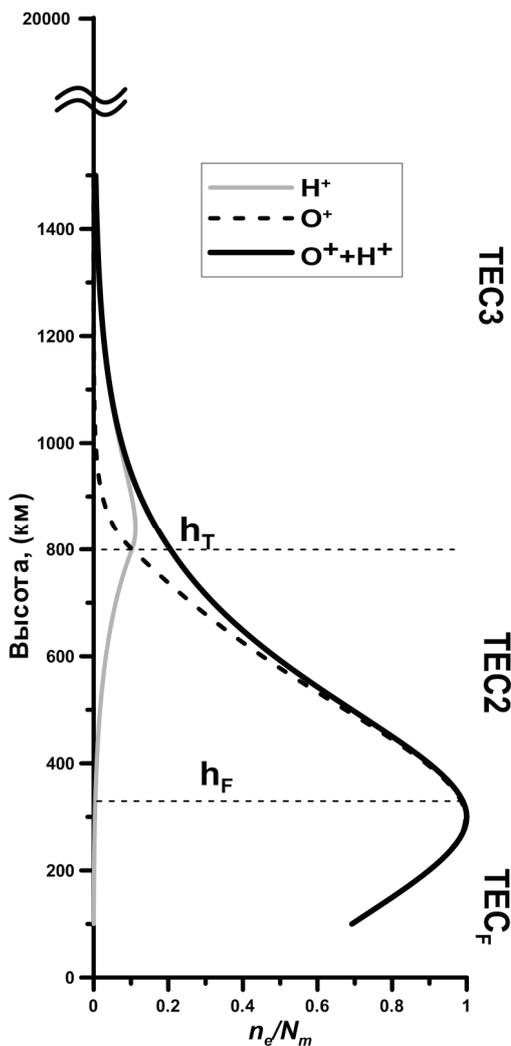


Рис. 1. Основные обозначения и схема расчетов для предложенной модели

На рис. 1 изображено распределение основных компонент (3), (4), а также распределение суммарной концентрации ионов (5). Из уравнений (5) видно, что в случае одинаковой шкалы перехода  $H_T$  для  $O^+$  и  $H^+$ , размер переходной области (области смешивания) не влияет на распределение ионной концентрации в плазмосфере. Предлагаемая модель является довольно реалистичной при рассмотрении внешней ионосферы.

Как было описано выше, в рамках такой модели все параметры, исключая  $H_{O^+}$  и  $h_T$ , могут быть измерены с помощью ИРНР. Для определения высоты  $h_T$ , мы выделили 3 высотных диапазона, которые разделяются высотами  $h_F$  и  $h_T$  (см. рис. 1). Высота  $h_F$  соответствует высоте Фарадеевского минимума выше  $h_m$ . Ниже этой высоты электронное содержание рассчитывается по формуле (1). На втором высотном интервале ТЕС2, выше  $h_F$  и ниже  $h_T$ , функцию простого Чепменовского слоя можно упростить и записать как:

$$\tilde{n}_0(h) = N_m \exp(1-z) . \quad (6)$$

В логарифмических координатах экспериментальный профиль  $n_e(h)$  может быть аппроксимирован функцией линейной регрессии:

$$\ln n_e \cong ah + b . \quad (7)$$

Коэффициенты  $a$  и  $b$  в (7) рассчитываются из экспериментально получаемого на ИРНР профиля электронной концентрации. Для расчетов используется диапазон выше  $\sim 350$ - $500$  км, т.е. выше  $h_m$  и ниже предполагаемой высоты перехода  $h_T$ . При таком подходе можно записать  $a = -\frac{1}{H_{O^+}}$  и  $b = \ln(N_m) + 1 + \frac{h_m}{H_{O^+}}$ . Таким образом для TEC2 получим:

$$TEC2 = \frac{1}{a} \times (\exp(ah_T + b) - \exp(ah_F + b)) . \quad (8)$$

Используя выражения (5) для модели, можно вычислить TEC3:

$$\begin{aligned} TEC3 &= n_0(h_T) \int_{h_T}^{h_{GPS}} (1 - \exp(\frac{a}{M}(h - h_T))) dh = \\ &= \exp((ah_m + b - 1) + a(h_T - h_m)) \cdot (h_{GPS} - h_T - \frac{M}{a}(e^{\frac{a}{M}(h_{GPS} - h_T)} - 1)). \end{aligned} \quad (9)$$

В этом выражении экспонента в последнем слагаемом может не учитываться, т.к.  $e^{-6} \cong 0,003$  очень мала по сравнению с другими слагаемыми. В сравнении с высотой пролета спутников GPS (20 000 км), высота  $h_T$  мала (порядка 4%) и поэтому в последних скобках можно использовать некоторое среднее значение  $h_{T_0} \cong 800 \div 1200$  км, тогда выражение (9) можно переписать в виде:

$$TEC3 \cong \exp(ah_T + b - 1) \cdot (h_{GPS} + MH_{O^+} - h_{T_0}) . \quad (10)$$

Полное электронное содержание, которое мы берем из GPS IONEX карт, равно сумме на всех 3х участках:

$$TEC_{GPS} = TEC_F + TEC2 + TEC3 . \quad (11)$$

Подставляя в эту формулу все ранее полученные выражения для электронного содержания на различных участках, можно однозначно определить  $h_T$ :

$$h_T = \frac{1}{a} \ln \left( \frac{\frac{a(TEC_{GPS} - TEC_F)}{\exp(b)} + \exp(ah_F)}{\frac{1}{e}(ah_{GPS} - M - ah_{T_0}) - 1} \right) . \quad (12)$$

Рассматриваемая модель внешней ионосферы требует, чтобы  $n(h_T)$  не была меньше или равной нулю. То есть, условие  $h_T < -\frac{b}{a}$ , является условием применимости модели.

Наличие примесных ионов  $\text{He}^+$  учитывается в модели изменением массового фактора  $M$ . Для экспериментальных данных  $a \approx -0,02$ , следовательно  $ah_{GPS} \approx 100 \gg M$ , поэтому очевидно, что добавки, связанные с разным содержанием ионов гелия не вносят значительного вклада в изменение  $h_T$ .

Точность предложенного метода мы оцениваем по точности оценок ПЭС, как  $\pm 3 \text{ TECU}$ , и связанное с этой ошибкой среднеквадратичное отклонение значений  $h_T$  не превышает 80 км.

## Эксперимент

Для проверки репрезентативности данной модели нами были обработаны данные, полученные на ИРНР в годы высокой солнечной активности (1998–2002 гг.). Были исследованы вариации высоты перехода  $h_T$ , связанные с геомагнитной активностью, а также электронное содержание плазмосферы (выше  $h_T$ ) по отношению к ПЭС GPS.

Расчет коэффициентов  $a$  и  $b$  проводился по профилям электронной концентрации в диапазоне высот  $\sim 150$  км, начиная с высоты на 30 км выше  $h_m$ . Временное разрешение данных IONEX GPS составляет 2 часа, поэтому мы использовали линейную интерполяцию этих данных, чтобы получить временное разрешение, соответствующее разрешению ИРНР ( $\sim 2$  мин).

В настоящей работе мы рассматриваем результаты достаточно продолжительных экспериментов, полученные весной (2–12 апреля) и осенью (1–10 октября) 2002 г. Регулярное влияние на суточный ход высоты перехода  $h_T$  оказывает фотоионизация, за счет солнечного УФ излучения. В результате днем идет активное ионообразование в F2 слое, и амбиполярная диффузия формирует направленный вверх поток ионов  $\text{O}^+$ , который увеличивает высоту перехода. Ночью фотоионизация прекращается, и ионизация поддерживается потоком  $\text{H}^+$  из плазмосферы, что приводит к понижению  $h_T$ . Вариации день/ночь являются регулярными в спокойных условиях для любого сезона.

Следуя концепции, изложенной в работе (Hanson and Ortenburger, 1961),  $h_T$  является равновесной критической высотой, которая действует как диффузный барьер, на котором происходит реакция перезарядки  $\text{H}^+ + \text{O} = \text{O}^+ + \text{H}$ . Такой подход является идеализированным и справедлив только для условий диффузионного равновесия. В реальной ионосфере это условие часто нарушается в результате геомагнитных возмущений. В возмущенных условиях нельзя говорить о равновесном состоянии данного диффузионного

барьера, и его форма может изменяться за счет высыпания фотоэлектронов или сверхзвуковых потоков частиц вдоль геомагнитной трубки.

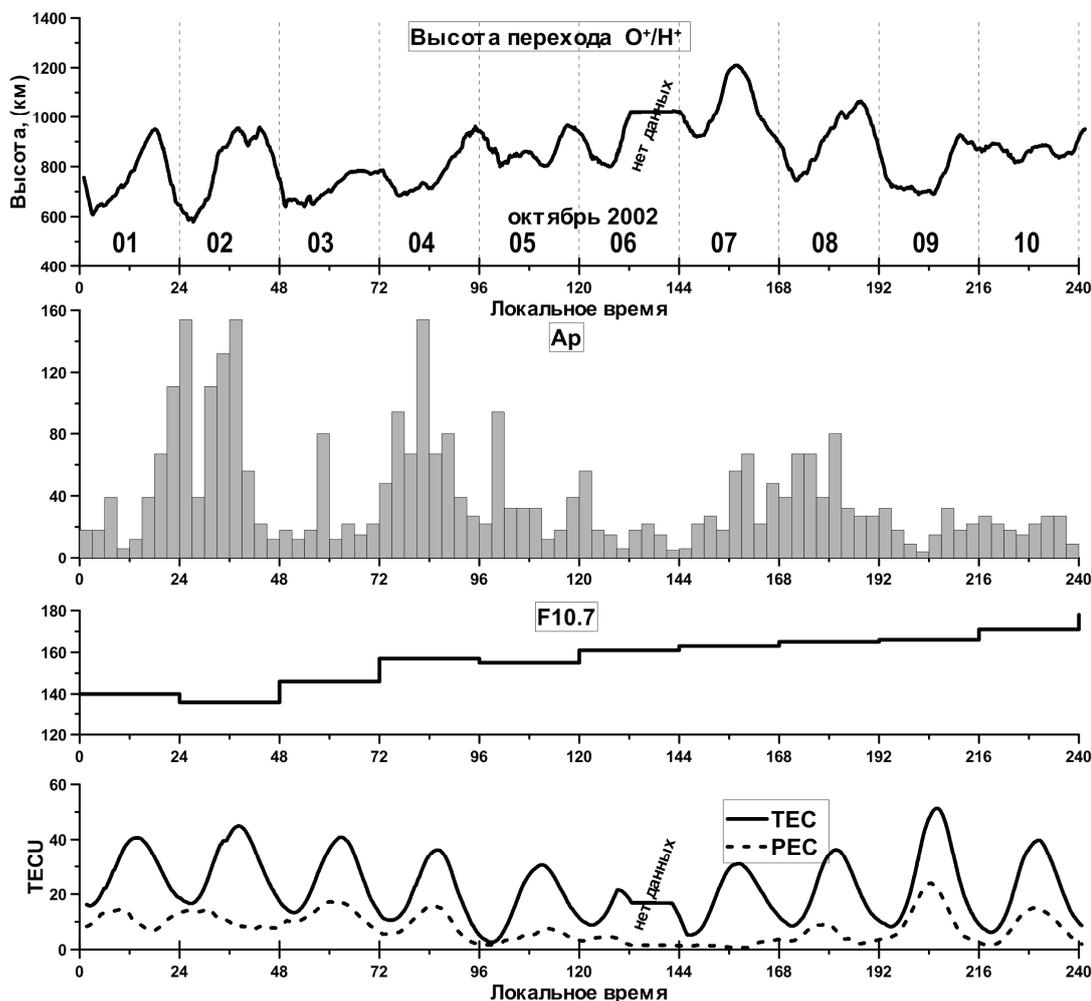


Рис. 2. Расчеты высоты перехода  $O^+/H^+$  и относительного вклада электронного содержания плазмосферы (PEC) в полное электронное содержание (TEC) за период 1–10 октября 2002 г.

На рис. 2 представлены результаты расчетов по модели для 1–10 октября 2002 г. На верхней панели показана высота перехода  $O^+/H^+$ , на нижней – электронное содержание плазмосферы и ПЭС GPS. Также приведены параметры геомагнитной активности (3х часовые Ap индексы) и дневные индексы F10.7, характеризующие солнечную активность. Можно видеть, что на протяжении всего эксперимента происходит повышение значений индекса F10.7 со 140 до ~180 и, как следствие, регулярное повышение среднесуточных значений  $h_T$  (верхний график). Рассматриваемый период относится к возмущенным геомагнитным условиям. Во время максимальных значений Ap (2 октября), наблюдается наибольшая разница между дневными и ночными значениями  $h_T$ . Вклад электронного содержания плазмосферы (PEC-plasmasphere electron content) в ПЭС, составляет ~50% ночью и 30% днем.

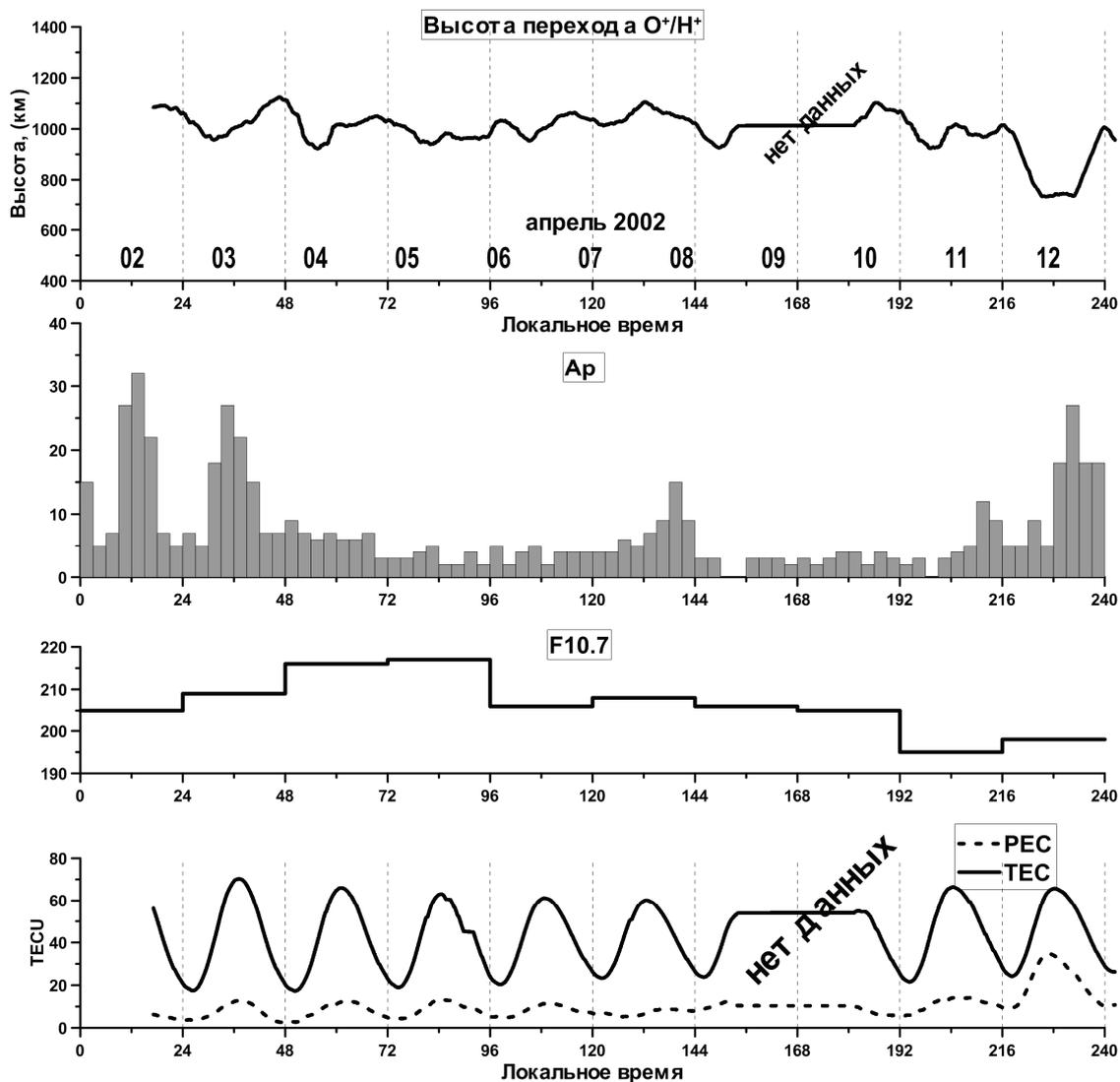


Рис. 3. Расчеты высоты перехода  $O^+/H^+$  и относительного вклада электронного содержания плазмосферы (PEC) в полное электронное содержание (TEC) за период 2–12 апреля 2002г.

На рис. 3 представлены аналогичные графики для 2–12 апреля 2002 г. Этот период отличается низкой геомагнитной активностью, в большинстве дней  $A_p$  не превышает 10. Амплитуда суточного хода  $h_p$  (верхняя панель) гораздо меньше, чем в октябре (рис. 2). В наиболее спокойные дни она не превышает 100 км. Однако среднесуточные значения высоты перехода в апреле значительно выше  $\sim 1000$  км. Это, очевидно, связано с более высоким потоком солнечной радиации (F10.7 на протяжении почти всего эксперимента не опускается ниже 200). Электронное содержание плазмосферы (нижний график) составляет около 20% от полного электронного содержания.

В настоящей работе представлены результаты моделирования для условий равноденствия. Данные расчетов для летнего и зимнего солнцестояния показали, что динамика  $h_p$  в эти сезоны сильно зависит от динамики заполнения/опустошения плазмосферного резервуара, которая в свою очередь зависит от разного уровня освещенности в сопряжен-

ных ионосферах средних широт. В зимней ночной ионосфере, в спокойных условиях ионизация происходит только за счет плазмосферных протонов, поэтому высота перехода иногда опускается ниже 600 км и сильно меняется при изменении скорости и направления нейтрального ветра. Летом значения  $h_T$  обычно превышают 1000 км, однако в дневные часы, несмотря на высокую скорость ионизации, значения  $h_T$  часто бывают ниже 1000 км, вследствие очень сильного меридионального нейтрального ветра с экватора, который опускает ионы атомарного кислорода вниз. В этих условиях суточный максимум ионизации и максимальные значения  $h_T$  наблюдаются в локальную полночь, когда скорость нейтрального ветра уменьшается.

Динамика полученных в рамках модели параметров, области перехода, качественно согласуется с данными прямых измерений высоты  $h_T$  на радаре Аресибо (MacPherson et al., 1998), (Garzón et al., 2011), (Gonzales et al., 2004), и соответствует классическим представлениям о свойствах переходной области между ионосферой и плазмосферой (Брюнелли, Намгаладзе 1986), (Кринберг, Ташилин 1984). Поэтому предложенная модель может быть использована далее для анализа особенностей сезонной динамики внешней ионосферы и плазмосферы в условиях разной солнечной и геомагнитной активности. Распределение электронной концентрации плазмосферы, которое можно оценивать по величине шкалы высот, также является полезным параметром для исследования ионосферно-плазмосферного взаимодействия.

## Выводы

Метод для оценки высоты перехода  $O^+/H^+$ , на базе данных радара некогерентного рассеяния и данных спутников GPS/GLONASS, является доступным и относительно простым методом для исследования электронной концентрации и ионного состава внешней ионосферы. Алгоритм, представленный в статье, может быть особенно полезен, если его интегрировать в теоретические модели, в которых высота перехода  $O^+/H^+$  является важным граничным параметром.

Результаты измерений имеют качественное согласие с прямыми измерениями на радаре НР в Аресибо. Наблюдаемые вариации высоты перехода  $O^+/H^+$  показывают динамику, которая очевидно связана с солнечной и геомагнитной активностью, а также в разной степени зависит от термосферного нейтрального ветра и параметров плазмосферного резервуара. Изучение динамики высоты перехода  $h_T$  и выявление механизмов, ее определяющих, является целью дальнейших исследований.

## Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант 11-05-00822-а и 12-05-31279-мол\_а) и Министерства образования и науки РФ (проект 16.518.11.7097).

## Литература

1. Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы // Наука, 1988.
2. Жеребцов Г.А., Заворин А.В., Медведев А.В., Носов В.Е., Потехин А.П., Шпынев Б.Г., Иркутский радар некогерентного рассеяния // Радиотехника и электроника. 2002. Т.47. № 11. С. 1339–1345.
3. Кринберг И.А., Таццилин А.В. Ионосфера и плазмаосфера // М.: Наука, 1984.
4. Б.Г. Шпынев, Г.А. Жеребцов, А.В. Таццилин, Д.С. Хабитуев, А.А. Щербаков, Анализ состояния среднеширотной внешней ионосферы по данным измерений на иркутском радаре ИР // Солнечно-Земная физика вып.16, 2010. С.15–20.
5. Garzón, D., C. Brum, E. Echer, N. Aponte, M. Sulzer, S. González, R. Kerr, and L. Waldrop, Response of the topside ionosphere over arecibo to a moderate geomagnetic storm // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 73. 2011. P. 1568–1574.
6. Gonzalez S.A., Sulzer M.P., and Nicolls M.J. Solar cycle variability of nighttime topside helium ion concentrations over Arecibo // J. Geophys. Res. Vol. 109. A07302. doi:10.1029/2003JA010100, 2004.
7. Hanson, W. B., and I. B. Ortenburger, The coupling between the protonosphere and the normal F region // J. Geophys. Res. 66. 1961. P. 1425–1435.
8. Heelis R. A., Coley W. R., Burrell A. G., Hairston M. R., Power G. D. R. A., Harmon L. L., Holt B. J., Lippincott C. R. Behavior of the O<sup>+</sup>/H<sup>+</sup> transition height during the extreme solar minimum of 2008 // GRL. Vol. 36. L00C03. doi:10.1029/2009GL038652, 2009.
9. MacPherson B., Gonzalez S. A., Sulzer M.P., The effect of meridional neutral wind on the O<sup>+</sup> - H<sup>+</sup> transition altitude over Arecibo // JGR. Vol. 103. Issue A12. P. 29183–29198, 1998.
10. Mannucci A.J., Wilson B. D., Yuan D. N., Ho C. M., Lindqwister U. J., Runge T. F. A global mapping technique for GPS-derived ionospheric total electron-content measurements // Radio Science. 33 (3). 1998. P. 565–582.
11. Strangeways H.J., Kutiev I., Cander L.R., Kouris S., Gherm V., Marin D., De La Morena B., Pryse S. E., Perrone L., Pietrella M., Stankov S., Tomasik L., Tulunay E., Tulunay Y., Zernov N., Zolesi B. Near-Earth space plasma modeling and forecasting // Annals of Geophysics. Vol. 52. No. 3/4. 2009.
12. Shpynev B.G. Incoherent scatter Faraday rotation measurements on a radar with single linear polarization // Radio Science. Vol. 39. No. 3. 2004. doi: 10.1029/2001RS002523.

## Variations of O<sup>+</sup>/H<sup>+</sup> transition height over East Siberia from Irkutsk incoherent scatter data and GPS total electron content

D.S. Khabituev, B.G. Shpynev

*Institute of Solar-Terrestrial Physics, Irkutsk, Russia*  
*E-mail: Khabituev@iszf.irk.ru*

In the present work we investigate the topside ionosphere electron dynamics on the basis of previously developed method of transition level O<sup>+</sup>/H<sup>+</sup> determination, which combines the Incoherent Scatter Radar (ISR) experimental data and GPS TEC data. As the model we use modified Chapman function where O<sup>+</sup>/H<sup>+</sup> transition level is used as parameter. Distinct from the commonly used transition height model, we include into consideration an additional parameter - transition area scale height. This new model gives very realistic description of Arecibo ISR experimental data, where oxygen and hydrogen ion distributions were measured directly. In practical use of the model the shape of transition area does not affect the final result, and transition height can be derived from ISR-GPS data. On the basis of this technique we conducted investigation of seasonal and daily variations of transition height O<sup>+</sup>/H<sup>+</sup> for periods of high solar activity during equinoxes and solstices of the year 2002. We investigate the daily dynamics of

transition height and plasmasphere electron content contribution to GPS TEC in different geomagnetic conditions. It is shown that in solstices conditions the plasmasphere electron content can contribute as much as 50% to GPS TEC, and the input from plasmasphere can produce significant influence on GPS TEC variations. Some peculiarities of  $O^+/H^+$  transition height variations cannot be explained only by the solar and geomagnetic activity. We consider these events as the result of the plasma flux, associated with neutral thermosphere wind regime.

**Keywords:** topside ionosphere, transition height  $O^+/H^+$ , TEC GPS.

## References

1. Bryunelli B.E., Namgaladze A.A., *Fizika ionosfery* (The ionosphere physics), Moscow: Nauka, 1988.
2. Zherebtsov G.A., Zavorin A.V., Medvedev A.V., Nosov V.E., Potekhin A.P., Shpynev B.G., Irkutskii radar nekogerentnogo rasseyaniya (Irkutsk Incoherent Scatter Radar), *Radiotekhnika i elektronika*, 2002, Vol. 47, No. 11, pp.1339–1345.
3. Krinberg I.A., Tashchilin A.V., *Ionosfera i plazmosfera* (Ionosphere and Plasmasphere), Moscow: Nauka, 1984.
4. Shpynev B.G., Zherebtsov G.A., Tashchilin A.V., Khabituiev D.S., Shcherbakov A.A., Analiz sostoyaniya sredneshirotnoi vneshnei ionosfery po dannym izmerenii na irkutskom radare NR (The analysis of midlatitudinal topside ionosphere behavior based on Irkutsk Incoherent Scatter Radar data), *Solnechno-Zemnaya fizika*, Issue 16, 2010, pp.15–20.
5. Garzón D., C. Brum, E. Echer, N. Aponte, M. Sulzer, S. González, R. Kerr, and L. Waldrop, Response of the topside ionosphere over Arecibo to a moderate geomagnetic storm, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol. 73, 2011, pp. 1568–1574.
6. Gonzalez S.A., Sulzer M.P., and Nicolls M.J., Solar cycle variability of nighttime topside helium ion concentrations over Arecibo, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 109, Issue A07, 2004.
7. Hanson W.B., and I.B. Ortenburger, The coupling between the protonosphere and the normal F region, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 66, Issue 5, 1961, pp. 1425–1435.
8. Heelis R.A., Coley W.R., Burrell A.G., Hairston M.R., Power G.D. R.A., Harmon L.L., Holt B.J., Lippincott C.R., Behavior of the  $O^+/H^+$  transition height during the extreme solar minimum of 2008, *Geophysical Research Letters*, Vol. 36, Issue 18, 2009.
9. MacPherson B., Gonzalez S.A., Sulzer M.P., The effect of meridional neutral wind on the  $O^+-H^+$  transition altitude over Arecibo, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 103, Issue A12, pp. 29183–29198, 1998.
10. Mannucci A.J., Wilson B. D., Yuan D. N., Ho C. M., Lindqwister U. J., Runge T. F. , A global mapping technique for GPS-derived ionospheric total electron-content measurements, *Radio Science* , Vol. 33 (3), pp. 565–582, 1998.
11. Strangeways H.J., Kutiev I., Cander L.R., Kouris S., Gherm V., Marin D., De La Morena B., Pryse S.E., Perrone L., Pietrella M., Stankov S., Tomasik L., Tulunay E., Tulunay Y., Zernov N. Zolesi B., Near-Earth space plasma modeling and forecasting, *Annals of Geophysics*, Vol. 52, No. 3/4, 2009.
12. Shpynev B.G., Incoherent scatter Faraday rotation measurements on a radar with single linear polarization, *Radio Science*, Vol. 39, No. 3, 2004, doi: 10.1029/2001RS002523.