

ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ  
ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

УДК 550.388

**В.И. Таран, Е.И. Григоренко**

**Исследование поведения ионов водорода методом некогерентного рассеяния (НР). Сравнение результатов, полученных на радаре НР в Харькове, с данными радаров в Аресибо и Миллстоун Хилле, спутников Atmosphere Explorer и модели FLIP**

*Институт ионосферы НАН и МОН Украины, г. Харьков*

Поступила в редакцию 16.09.2002 г.

Проводится сравнение результатов измерения концентрации ионов водорода  $H^+$  на радаре НР в Харькове, Аресибо и Миллстоун Хилле во внешней ионосфере (до высот 1000–1300 км). Рассматриваются условия зимы и лета, минимума и максимума солнечной активности. Измерения показали, что характер высотных и суточных вариаций концентрации ионов  $H^+$  в ионосфере над восточным и западным полушариями, в основном, имеет близкий характер. Обнаружен значительный долготный эффект в поведении относительной концентрации ионов  $H^+$  для среднеширотных радаров в Харькове и Миллстоун Хилле, который объясняется отличием параметров  $L$  и объемов магнитных силовых трубок за счет несовпадения географического и геомагнитного полюсов Земли. Данные харьковского радара сравниваются также с результатами, полученными на спутниках Atmosphere Explorer (AE) и из расчетов по модели FLIP, которые относятся к среднеширотному региону, условиям дня и ночи местного времени и минимуму солнечной активности. Сравнение показало согласие характера высотного распределения ионов  $H^+$  и условий ионосферно-плазмосферного взаимодействия. В то же время концентрации  $H^+$ , измеренные на радаре в Харькове, превышают значения, полученные с помощью AE и из расчета по модели. Это несоответствие объясняется отличием гелиогеофизических условий.

**Введение**

Известно, что ионы водорода являются важной компонентой верхней атмосферы Земли. Их поведение служит чувствительным датчиком состояния космической погоды и ее возмущений. Возмущения являются отражением геокосмических бурь – сложного явления, которое охватывает магнитосферу Земли, околоземное пространство и контролируется процессами на Солнце. Бури оказывают значительное воздействие на технологическую деятельность человека и «здоровье» всей биосферы Земли. Исследование морфологии и динамики легких ионов во внешней ионосфере в глобальном масштабе проводится с помощью современных установок космического и наземного базирования, включая спутники и мировую сеть радаров некогерентного рассеяния (НР). Сложность и высокая стоимость исследований окупаются благодаря значительной ценности получаемой информации. Результаты наблюдений используются для изучения солнечно-земных связей, а также для решения прикладных задач. К ним относятся уточнение глобальных справочных моделей ионосферы, прогнозирование космической погоды и условий распространения радиоволн, калибровка данных спутников, которые проводят исследования магнитосферы Земли и т.п.

Использование мировой сети радаров НР является ключевым моментом в исследовании широтных и долготных вариаций ионного состава верхней атмосферы Земли. Исследования проводятся в соответствии с календарем координированных наблюдений

по международной программе POLITE (Plasmaspheric Observations of Light Ions in the Topside and Exosphere), которая является частью исследовательского проекта NSF CEDAR (Coupling, Energetics and Dynamics of Atmospheric Regions).

В рамках таких исследований значительный интерес представляет сравнение результатов наблюдений. Результаты из разных регионов Земли важны для понимания ионосферных процессов в глобальном масштабе. Результаты, полученные с помощью различных инструментов, необходимы для проверки методик экспериментов.

Систематические измерения высотного распределения ионов водорода методом НР над Харьковом проводятся с 1996 г. Радар НР Харьковского института ионосферы является единственной установкой такого рода на средних широтах европейского региона. Всего в мире существует восемь установок НР, из них четыре принадлежат США и по одной – Северной Европе, Японии, России и Украине. В данной статье приведено сравнение результатов, полученных с помощью радара в Харькове и радаров в Аресибо и Миллстоун Хилле, расположенных на Американском континенте, в условиях зимы и лета, минимума и максимума солнечной активности (СА). Кроме того, высотные распределения ионов водорода во внешней ионосфере, измеренные на радаре в Харькове, сравниваются с данными спутников Atmosphere Explorer (AE) и с результатами расчетов по модели FLIP. Используются данные спутников и модели, относящиеся к среднеширотному региону Земли, который соответствует внутренней плазмосфере ( $L = 2$ ) и диапазону инвариантных широт 40–50°, т.е.

приблизительно координатам радара в Харькове. Рассматриваются условия лета и зимы, дня и ночи местного времени в минимуме солнечной активности.

## 1. Исследования ионосферы с помощью радара некогерентного рассеяния в Харькове

Харьковский институт ионосферы проводит исследование методом некогерентного рассеяния в течение более чем 30 лет. Метод позволяет получать наиболее полный объем информации о параметрах ионосферной плазмы с высокой точностью и в интервале высот от 100 до нескольких тысяч километров. Радар расположен вблизи г. Харькова (геомагнитные координаты: 45,7 и 117,8°, географические координаты: 49,6 и 36,3°). Широта Харькова почти совпадает с широтой Иркутска (Россия) и близка к широте Миллстоун Хилла (США). Кроме того, радар расположен практически на одной геомагнитной долготе с радаром EISCAT. Такое расположение харьковского радара удачно дополняет мировую сеть РНР, выполняющих исследование широтно-долготных эффектов в поведении ионосферы. Радар метрового диапазона работает на частоте 158 МГц с максимальной мощностью передатчика ~ 3,6 МВт (средняя мощность – 100 кВт), поляризация – круговая. Зенитная 100-м параболическая антенна Кассегрена имеет коэффициент усиления около 12700 (эффективная поверхность около 3700 м<sup>2</sup>, ширина луча ~ 1°), температура системы – 570–1320 К, шумовая температура высокочувствительного приемника – 120–240 К.

Для исследования внешней ионосферы применяется режим зондирования одиночным ~ 800-мкс импульсом, который обеспечивает измерения легких ионов до высот ~ 1500 км. Накопление сигнала в течение 1–15 мин при входных соотношениях сигнал-шум 10–0,1 позволяет измерять ионосферные параметры с точностью около 3–20%. Температуры и ионный состав определяются из измеренных автокорреляционных функций (АКФ) рассеянного сигнала путем сравнения их с теоретическими АКФ методом наименьших квадратов. Синусная и косинусная компоненты АКФ сигнала используются для одновременного определения вертикальной скорости ионов. Детальное описание устройств радара, методик измерений и обработки данных в различных режимах работы радара, определяемых программой научных исследований, приведено, например, в работах [1–4].

## 2. Сравнение результатов наблюдений и обсуждение

### 2.1. Данные, полученные с помощью радаров НР в Харькове и Аресибо в минимуме и максимуме активности Солнца

На рис. 1 приведены результаты измерения относительной концентрации ионов водорода  $n(\text{H}^+)/n_e$ , полученные на радаров НР в Аресибо ( $\Lambda = 30^\circ$  с.ш.,  $L = 1,4$ ) [5, 6] и в Харькове ( $\Lambda = 45,7^\circ$  с.ш.,  $L = 1,9$ )

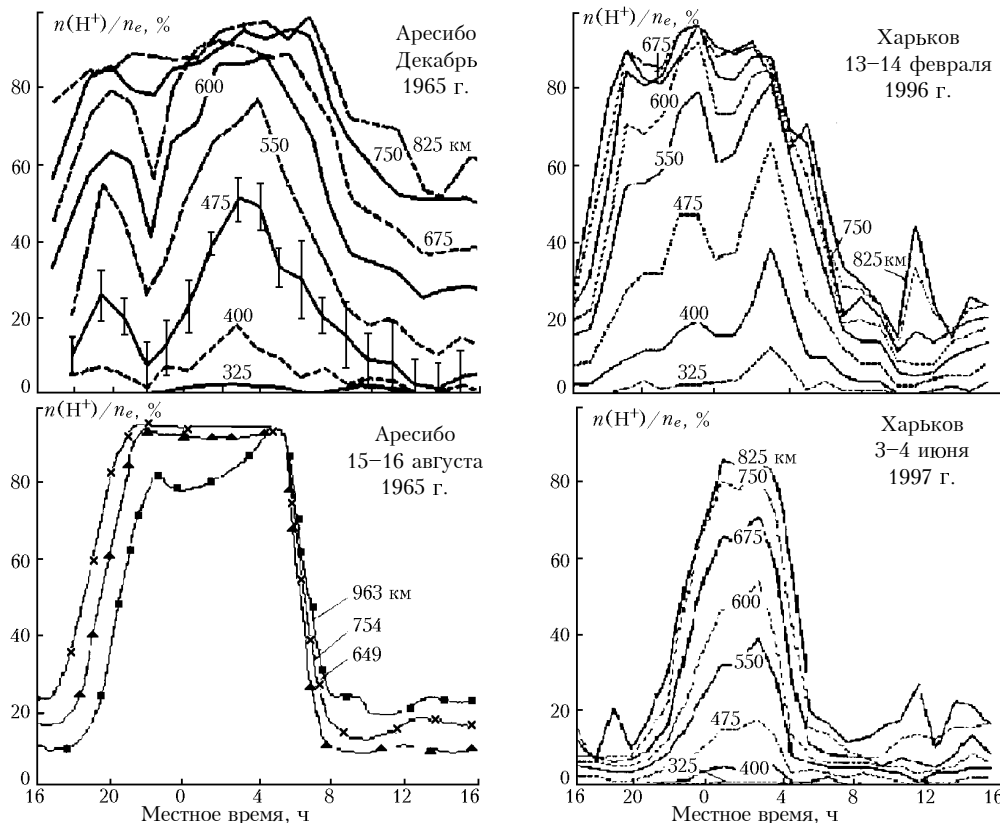


Рис. 1. Суточные вариации относительной концентрации ионов  $\text{H}^+$  над Харьковым и Аресибо зимой и летом в минимуме солнечной активности

в близких гелиогеофизических условиях низкой солнечной активности (даты выбраны в 1996, 1997 гг. для Харькова и в 1965, 1976 гг. для Аресибо). Здесь  $\Lambda$  – геомагнитная широта,  $L$  – параметр Мак-Илвейна в радиусах Земли  $R_E$ ,  $n_e$  – концентрация электронов. Видно, что характер суточного поведения ионов  $H^+$  зимой и летом в разных полушариях Земли принципиально аналогичен. Вместе с тем отмечаются различия, связанные с широтными и долготными особенностями в поведении внешней ионосферы.

Эти особенности сводятся к следующему. Максимум концентрации  $H^+$  в суточном цикле наблюдается на двух радарах ночью, перед восходом Солнца, и достигает одинаковой величины  $n(H^+)/n_e \sim 100\%$ . В дневное время, как известно, плазма диффундирует вверх, в протоносферу, за счет нагрева термосферы и повышения давления в области  $F$ . Концентрация легких ионов, в том числе  $H^+$ , уменьшается. При этом в Аресибо  $n(H^+)/n_e$  превышает значение в Харькове почти в 3 раза. Это превышение можно объяснить долготным эффектом в поведении легких ионов за счет разных объемов магнитных силовых трубок [7]:  $V \cong \frac{2}{3} R_E L^4$ .

Величина  $V$  представляет собой объем половины геомагнитной силовой трубки с единичным сечением на высоте нижней границы внешней ионосферы. Для Харькова и Аресибо отличие объемов составляет  $\sim 3,4$  раза. Меньший объем  $V$  геомагнитной силовой трубки определяет более высокую концентрацию  $H^+$  в Аресибо. Этот эффект ярче выражен на фоне низких дневных значений  $n(H^+)/n_e$ , тогда как ночью на двух радарах (в Харькове и Аресибо) зарегистрированы практически предельные величины относительной концентрации ионов  $H^+$ . Следует отметить также широтные эффекты в поведении внешней ионосферы, связанные с особенностями расположения Аресибо в приэкваториальном географическом секторе (южнее Северного тропика). Благодаря этому продолжительность неосвещенного времени в Аресибо составляет практически половину суток в отличие от среднеширотного радара в Харькове, и этот фактор также определяет суточные вариации ионов  $H^+$ .

В Харькове концентрация  $H^+$  ночью зимой больше, чем летом (см. рис. 1). На высоте 550 км сезонное отличие составляет примерно 2 раза. Как известно, оно обусловлено тем, что зимняя термосфера содержит большее количество нейтрального водорода по сравнению с летней. Наблюдается также влияние восхода Солнца в магнитносопряженной точке (МСТ) на поведение ионов  $H^+$  над Харьковом. Так, зимой уменьшение концентрации ионов водорода начинается после восхода Солнца в МСТ (около 4 ч), тогда как местный восход происходит на  $\sim 2,5$  ч позже. Этот эффект, как известно [7], обусловлен тепловым расширением еще не освещенной зимней ионосферы за счет нагрева плазмы в силовой трубке фотозлектронами летнего полушария. МСТ для Харькова находится в районе острова Мадагаскар.

На рис. 2 приведены высотные профили основных компонент ионосферной плазмы для зимы максимума СА по данным радаров в Харькове и Аресибо [8]. Сравнение результатов показывает, в основном, их неплохое согласие. Отличия связаны, по-видимому, с разными значениями в рассматриваемые даты потока солнечного излучения  $F_{10,7}$ , к величине которого поведение ионов  $H^+$  очень чувствительно [9]. Данные Аресибо соответствуют усредненному (за 81 день) потоку  $F_{10,7} \sim 220$  ед., данные Харькова – потоку  $F_{10,7} \sim 180$  ед. Этим объясняется дневное превышение максимальных значений концентрации  $H^+$  в Харькове ( $\sim 3,5 \cdot 10^4$  см $^{-3}$ ) по сравнению с Аресибо ( $\sim 1,5 \cdot 10^4$  см $^{-3}$ ). В ночное время, по-видимому, преобладают долготные эффекты, и концентрация  $H^+$  в Аресибо ( $\sim 2 \cdot 10^4$  см $^{-3}$ ) превышает концентрацию в Харькове ( $\sim 1 \cdot 10^4$  см $^{-3}$ ). Уровень перехода  $h_t$  от ионосферы к протоносфере, где  $n(H^+) = n(O^+)$ , в Аресибо расположен выше, чем в Харькове, примерно на 250 км днем и на 50 км ночью. Как известно, он определяется совместными вариациями концентрации ионов  $O^+$  и  $H^+$ , имеющими противоположный характер.

Высотные распределения ионов  $H^+$ , полученные над Аресибо и Харьковом, дают дополнительную информацию о характере ионосферно-плазматического взаимодействия в разных пунктах наблюдения. Можно предположить, анализируя высотные профили  $n(H^+)$  (см. рис. 2), что в дневное время зимой восходящий поток ионов водорода  $\Phi = n_i V_{iz} > 0$  в Харькове был близок к критическому значению, тогда как в Аресибо он имел меньшую величину. Ночью в двух пунктах наблюдался нисходящий поток  $\Phi < 0$  из протоносферы, являющийся источником плазмы для ночной области  $F$ .

Сравнение данных, полученных с помощью радаров в Харькове и Аресибо, свидетельствует об особой ценности результатов одновременных наблюдений, проводимых в рамках координированных международных программ исследования ионосферы. Пример такого сопоставления приведен ниже.

## 2.2. Результаты одновременных измерений концентрации ионов $H^+$ над Харьковом и Миллстоун Хиллом

Эти результаты в виде высотно-временных зависимостей относительной концентрации ионов  $H^+$  иллюстрирует рис. 3. Данные над американским континентом получены с помощью РНР Обсерватории Хейстек в Миллстоун Хилле (Массачусетский технологический институт, США). Измерения проводились по программе POLITE CEDAR.

Радары расположены на близких географических широтах в разных долготных секторах. Географические координаты установки в Миллстоун Хилле: 42,6° с.ш., 71,5° з.д., в Харькове: 49,6° с.ш., 36,3° в.д. Несовпадение географического и геомагнитного полюсов Земли приводит к значительному отличию геомагнитных широт радаров: 52,9 и 45,7° с.ш. и параметров  $L$ : 3,3 и 1,9 для Миллстоун Хилла и Харькова соответственно.

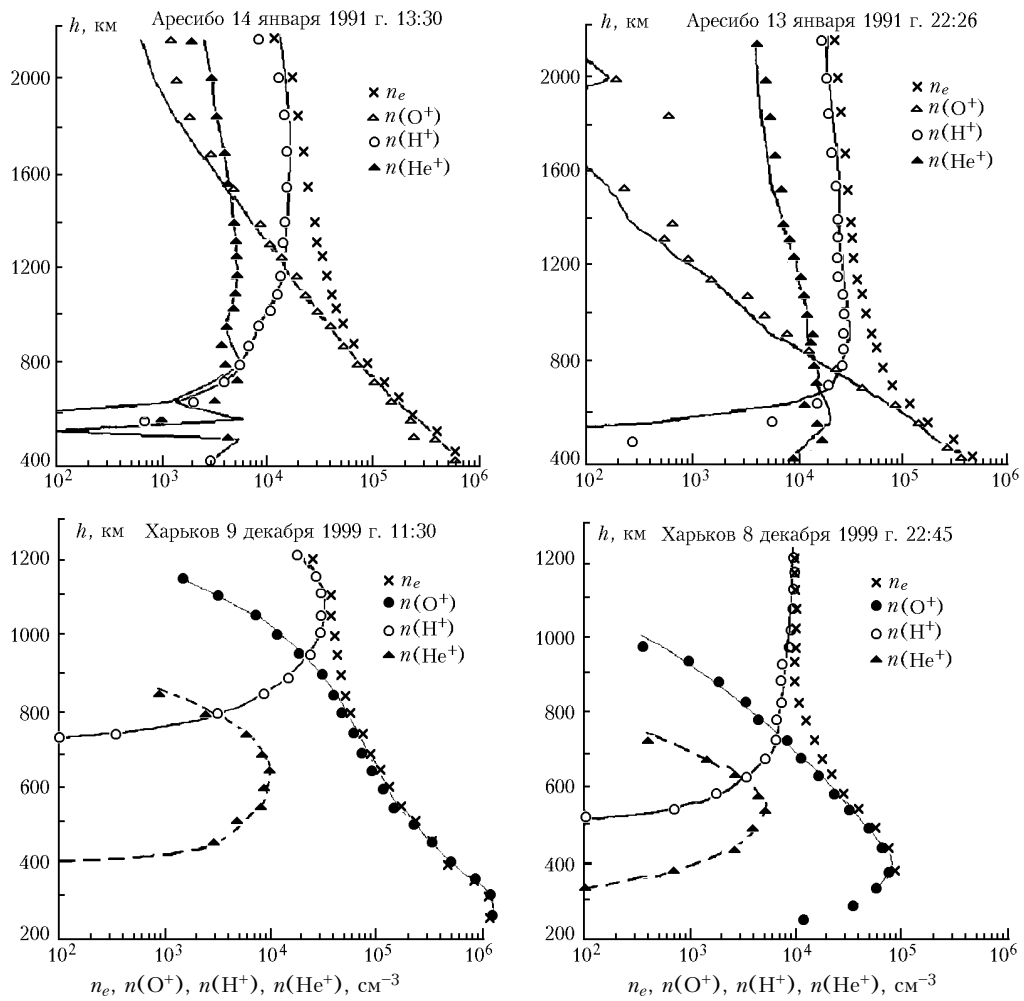


Рис. 2. Высотные профили концентрации ионов  $\text{O}^+$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{He}^+$  и электронов в годы максимума СА

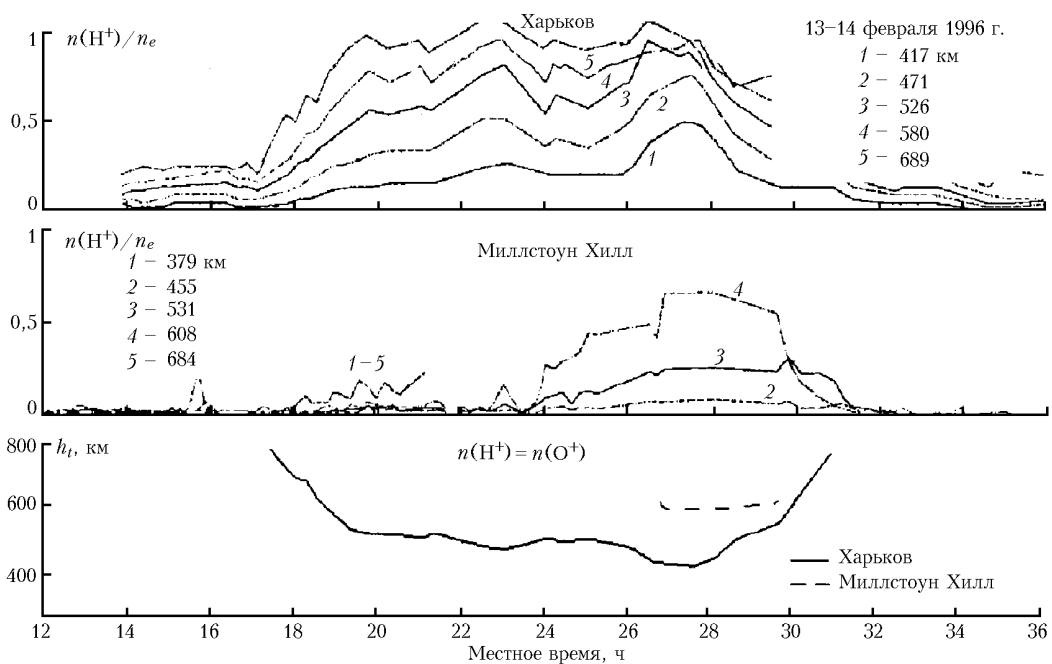


Рис. 3. Результаты одновременных измерений относительной концентрации ионов  $\text{H}^+$  и высоты перехода от ионосферы к протосфере  $h_t$ , км, где  $n(\text{H}^+) = n(\text{O}^+)$ , с помощью радаров НР в Харькове и Миллстоун Хилле по программе POLITE CEDAR

Различие в параметре  $L$  приводит к отличию объемов магнитных силовых трубок примерно в 9 раз. Этот факт объясняет высокие относительные концентрации ионов  $H^+$  над Харьковом. Их превышение над значениями  $n(H^+)/n_e$  в Миллстоун Хилле, например, ночью на высоте  $\sim 450$  км составляет около 6 раз. При этом переход от ионосферы к протоносфере над Харьковом происходит на высотах  $h_t = 400 \div 800$  км, тогда как над Миллстоун Хиллом  $h_t$  лежит выше на 100–200 км и наблюдается только глубокой ночью. Следует отметить также различный вклад в состояние зимней ионосферы над рассматриваемыми пунктами дополнительного нагрева фотоэлектронами из освещенного (летнего) полушария. Для Миллстоун Хилла сопряженная область расположена за Южным полярным кругом, где в это время Солнце не заходит, обеспечивая постоянный приток тепла из плазмосферы в ночную зимнюю ионосферу северного полушария и вызывая уменьшение концентрации ионов  $H^+$ . Для Харькова восход Солнца в МСТ происходит около 4 ч и вызывает начало утреннего падения  $n(H^+)$  над Харьковом примерно за 2,5 ч до местного восхода.

Результаты одновременных исследований явились практически подтверждением долготных вариаций в поведении ионов  $H^+$  во внешней ионосфере.

### 2.3. Факторы, контролирующие высотное распределение ионов водорода

Для анализа особенностей высотного распределения ионов  $H^+$  в многокомпонентной внешней ионосфере в случаях, приведенных ниже в п. 2.4, рассмотрим некоторые теоретические положения [7, 10].

Поведение внешней ионосферы определяется конкурирующим действием двух факторов: ионизирующим излучением Солнца и обменом плазмой с лежащей выше плазмосферой. Как известно, в процессе обмена плазма перерабатывается из кислородной в водородную и обратно, в соответствии с реакциями перезарядки:  $H + O^+ \leftrightarrow H^+ + O$ . Процесс перемещения плазмы (из ионосферы в протоносферу и наоборот) представляет собой амбиполярную диффузию, которая в удаленных областях протоносферы имеет ряд особенностей, связанных с большими пространственными масштабами процесса. Высотное распределение концентрации ионов водорода  $n(H^+)$  в общем случае может быть найдено путем численного интегрирования системы уравнений непрерывности и движения для ионов  $O^+$ ,  $H^+$  и электронов. Уравнение непрерывности для ионов водорода имеет вид

$$\frac{\partial n(H^+)}{\partial t} = q(H^+) - L(H^+) - \text{div} \{ \Phi(H^+) \},$$

где  $q(H^+)$  – скорость образования ионов водорода;  $L(H^+)$  – скорость потерь за счет химических процессов;  $\text{div} \{ \Phi(H^+) \} = \text{div} n(H^+) \mathbf{V}_d$  – локальный источник образования ионов или их потерь в результате процессов переноса (диффузии),  $\mathbf{V}_d$  – вектор скорости диффузии. Преобладание фотохимических или диф-

фузионных процессов зависит от соотношения их временных констант, которые определяются параметрами заряженных и нейтральных компонентов атмосферы. На некоторой высоте эти константы сравниваются. Обычно для ионов  $H^+$  это происходит на высотах 350–550 км. Ниже указанного уровня преобладают условия фотохимического, а выше – диффузионного равновесия.

Известно, что в переходной области между верхней частью слоя  $F2$  и протоносферой, где преобладают ионы  $O^+$ , а ионы  $H^+$  являются второстепенной компонентой, в условиях фотохимического равновесия, как и в случае диффузионного равновесия, концентрация ионов  $H^+$  растет экспоненциально с высотой [11]:

$$n(H^+) \propto \exp[z'/H(7)],$$

где  $H(7)$  – приведенная высота с «эффективной» массой ионов 7 а.е.;  $z'$  – геопотенциальная высота. В области, где доминируют ионы  $H^+$ , в условиях статического диффузионного равновесия концентрация  $H^+$  экспоненциально убывает с приведенной высотой плазмы:

$$n(H^+) \propto \exp[-z'/H(1/2)].$$

Очевидно, что на промежуточных высотах должен находиться максимум концентрации  $H^+$ . Условие статического диффузионного равновесия, о котором говорится выше, соответствует случаю нулевого потока заряженных частиц в покоящейся нейтральной атмосфере, когда в уравнении непрерывности для ионов  $H^+$  член

$$\text{div} \{ \Phi(H^+) \} \approx \partial \Phi_z / \partial z = 0 \text{ и } \mathbf{V}_d = 0.$$

В общем случае в многокомпонентной внешней ионосфере распределение концентрации  $n_j(s)$  заряженной компоненты  $j$ , которая диффундирует через неподвижную преобладающую компоненту  $i$  вдоль магнитной силовой линии (с координатой  $s$ ), находится путем решения уравнения непрерывности, которое в стационарных условиях в отсутствие источников и потерь и в пренебрежении расходимостью магнитных силовых линий имеет вид [7, 10]:

$$\frac{\partial}{\partial s} n_j V_j = \frac{\partial}{\partial s} \left[ -D_{ji} \left( \frac{\partial n_j}{\partial s} + \frac{n_j}{H_j} - \frac{n_j}{H_p} \right) \right] = 0,$$

где  $H_j$  и  $H_p$  – приведенные высоты компоненты  $j$  и плазмы;  $D_{ji}$  – коэффициент амбиполярной диффузии компоненты  $j$  через преобладающую компоненту  $i$ . Этому уравнению в общем случае динамического диффузионного равновесия удовлетворяют решение с постоянным ненулевым потоком

$$\Phi = n_j V_j = \text{const}$$

и распределение концентрации компоненты  $j$ :

$$n_j(s) = n_j^{(1)} (1 - \Phi/\Phi_L) + n_j^{(2)} \Phi/\Phi_L.$$

Здесь  $n_j^{(1)}$  – решение при  $\Phi = 0$  и  $n_j^{(2)}$  – при  $\Phi = \Phi_L$ , где  $\Phi$  – поток на верхней границе и  $\Phi_L$  – предельный (максимально возможный) диффузионный поток ионов (в нашем случае  $H^+$ ) вверх.

Рис. 4 иллюстрирует модельное представление о процессах ионосферно-плазматического взаимодействия и о высотном распределении концентрации ионов  $H^+$  и  $O^+$  во внешней ионосфере при различных значениях  $\Phi/\Phi_L$  [12].

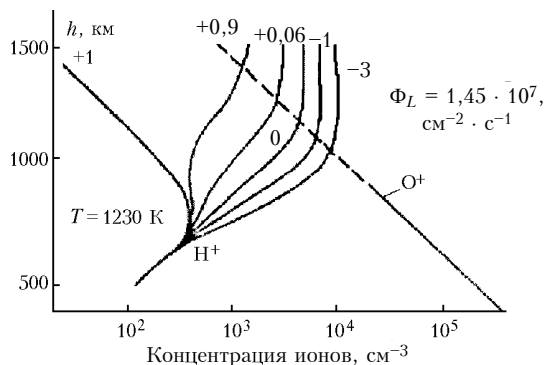


Рис. 4. Примеры численных расчетов высотных распределений  $n(H^+)$  и  $n(O^+)$  для разных значений  $\Phi/\Phi_L$  [12]

#### 2.4. Результаты, полученные с помощью радара НР в Харькове, из данных спутников Atmosphere Explorer и модели FLIP

В данном разделе проводится сравнение концентраций ионов водорода  $H^+$  во внешней ионосфере, измеренных с помощью средств наземного (радар НР в Харькове) и космического (спутники Atmosphere Explorer) базирования, а также рассчитанных по модели ионосферы FLIP. Данные спутников и модели привлечены

из работы [13]. Они относятся к среднеширотному региону Земли, который соответствует внутренней плазматосфере ( $L = 2$ ) и интервалу инвариантных широт  $\Lambda = 40-50^\circ$ , т.е. приблизительно координатам радара в Харькове. Теоретические расчеты в работе [13] выполнены по модели FLIP [14] (Field Line Interhemispheric plasma), которая описывает распределение параметров верхней атмосферы вдоль магнитной силовой линии между двумя полушариями.

Для сравнения взяты результаты измерений, проведенных с помощью радара НР в Харькове в феврале 1996-го и в июне 1997 г. Данные получены путем почасового усреднения 15-мин сеансов измерения (которые накоплены из исходных сеансов длительностью 1 мин) за 13-14 февраля 1996 г. и 3-6 июня 1997 г. Эти даты соответствуют магнитно-спокойным условиям, низкой солнечной активности и потоку  $F_{10,7} \approx 70$  ед.

Высотные профили  $n(H^+)$ , полученные из данных радара в Харькове, спутников АЕ и модельных расчетов, приведены на рис. 5. Далее они обсуждаются более подробно, опираясь на изложенные выше теоретические представления.

*Лето, полночь.* Высотный профиль концентрации ионов  $H^+$ , по данным модели FLIP, соответствует, по видимому, условиям статического диффузионного равновесия при  $\Phi = 0$  либо слабому нисходящему потоку  $\Phi < 0$ . В это же время данные спутника АЕ имеют два максимума и соответствуют скорее восходящему потоку  $\Phi > 0$ . Данные радара в Харькове по характеру высотного распределения ионов  $H^+$  и наличию двойного максимума на профиле согласуются больше с результатами АЕ, но превышают их по величине

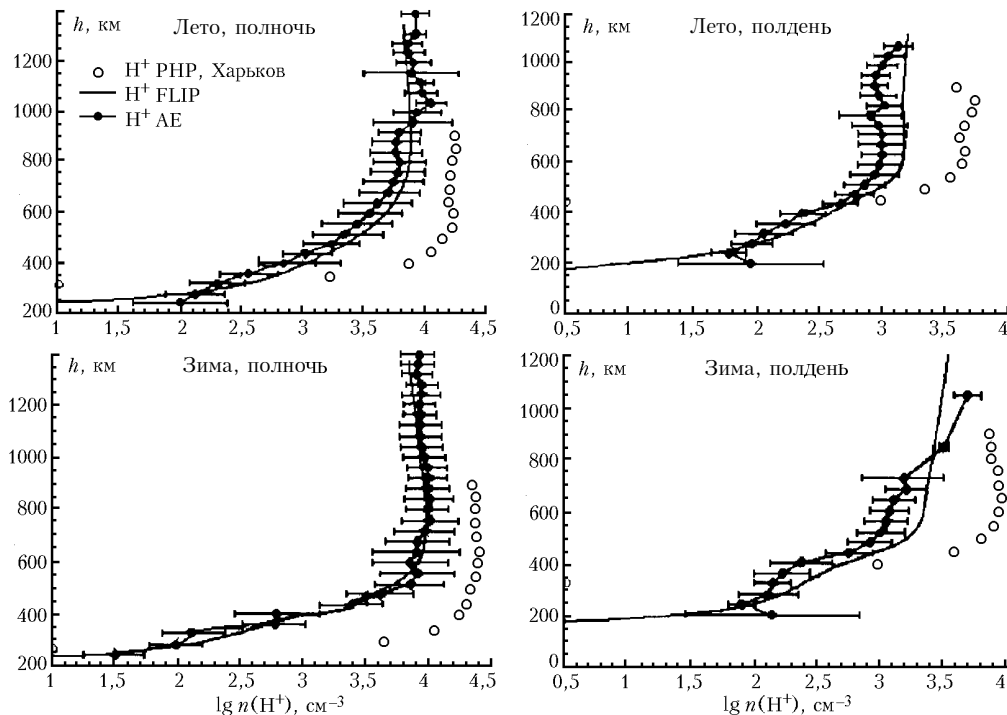


Рис. 5. Сравнение высотных профилей  $n(H^+)$ , полученных по данным радара НР в Харькове, спутников АЕ [13] и из модели FLIP [14]

во всем интервале высот. Например, на высоте 600 км, где наблюдается наибольшее различие, значения  $n(\text{H}^+)$  по данным АЕ ( $\sim 0,32 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ ) и Харькова ( $\sim 1,78 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ ) отличаются более чем в 5 раз.

*Лето, полдень.* Модельные расчеты и результаты спутника АЕ близки по форме и по величине  $n(\text{H}^+)$  и соответствуют восходящему потоку  $\Phi > 0$ , но, вероятно, при небольшом его значении по сравнению с предельным потоком  $\Phi_L$ . Данные радара имеют аналогичный характер высотного распределения  $n(\text{H}^+)$ , но превышают модельные расчеты в 3 раза и данные спутника АЕ в 4 раза на высоте 600 км.

*Зима, полночь.* Из рис. 5 видно, что модельные расчеты  $n(\text{H}^+)$  и результаты спутника АЕ практически совпадают и соответствуют, по-видимому, нисходящему потоку плазмы из протоносферы, что характерно для зимнего периода низкой СА. Данные харьковского радара при аналогичном характере профиля  $n(\text{H}^+)$  превышают значения спутника и модели до 3 раз на высоте 600 км.

*Зима, полдень.* Сравнимые результаты соответствуют, скорее всего, условиям слабого восходящего потока  $\Phi > 0$ . При этом данные радара на высоте 600 км превышают модельные значения в 5 раз и результаты спутника – до 7 раз.

Кратко проанализируем возможные причины значительного превышения концентрации ионов  $\text{H}^+$ , измеренной на радаре в Харькове, по сравнению с данными спутников и с модельными расчетами.

Следует отметить, что данные АЕ [13] получены путем усреднения обширного материала, полученного сериями спутников Atmosphere Explorers А, С, D, Е. Каждая точка является результатом усреднения за 6-часовой интервал, центрированный относительно полудня или полуночи местного времени, за 3-месячные периоды вблизи солнцестояния, охватывает диапазон индексов  $F_{10,7} = 70 \div 120$  ед. со средней величиной 92 ед. и все уровни геомагнитной активности. Кроме того, эти данные объединяют результаты измерений в двух полушариях Земли. Расчет по модели FLIP был проведен для аналогичных условий, в том числе для потока  $F_{10,7} = 100$  ед. Поэтому вполне можно ожидать, что усреднение данных спутников и расчеты, выполненные для столь широкого диапазона гелиогеофизических условий, не будут соответствовать результатам конкретных дат наблюдений в Харькове. Следует отметить также, что исследования внешней ионосферы над Харьковом в течение 1996–2002 гг. показали сильную зависимость концентрации ионов  $\text{H}^+$  от уровня СА (потока  $F_{10,7}$ ) [15]. Поэтому отличия сравниваемых значений  $n(\text{H}^+)$  можно объяснить несоответствием индекса  $F_{10,7}$ , описывающего минимум СА, для данных АЕ и модели [13] ( $F_{10,7} = 100$  ед.) и радара в Харькове ( $F_{10,7} = 70$  ед.).

## Заключение

Сравнение результатов, полученных с помощью различных средств наземного и космического базиро-

вания, необходимо для проверки методик измерений и для понимания ионосферных процессов в глобальном масштабе. В настоящей статье проводится сопоставление результатов измерений концентрации ионов водорода  $n(\text{H}^+)$  во внешней ионосфере, выполненных методом некогерентного рассеяния на радарх в Харькове, Аресибо и Миллстоун Хилле. Сравнение показало, что в различных гелиогеофизических условиях (день и ночь, зима и лето, минимум и максимум солнечной активности) высотно-временные вариации  $n(\text{H}^+)$  над восточным и западным полушариями Земли не имеют принципиальных отличий. Концентрация ионов  $\text{H}^+$  ночью больше, чем днем, как зимой, так и летом. Для Харькова это превышение составляет 2 раза в минимуме СА. Результаты одновременных наблюдений, выполненных на среднеширотных радарх в Харькове и Миллстоун Хилле по программе POLITE CEDAR, явились практическим подтверждением существенной долготной вариации в поведении ионов водорода. Она объясняется отличием параметров  $L$  и объемов магнитных силовых трубок за счет несовпадения географического и геомагнитного полюсов Земли. Проанализирован вклад в поведение ионов водорода в зимней ионосфере над Харьковом и Миллстоун Хиллом дополнительного нагрева фотоэлектронами из сопряженного летнего полушария.

Данные радара в Харькове сравниваются также с результатами измерений  $n(\text{H}^+)$  на спутниках Atmosphere Explorer и с расчетами ионного состава по модели FLIP. Результаты сравнения интерпретируются в свете современных представлений о процессах ионосферно-плазмозферного взаимодействия и распределения ионов  $\text{H}^+$  в многокомпонентной внешней ионосфере. Сравнение показало, в основном, согласие в характере высотного распределения  $n(\text{H}^+)$  по данным радара в Харькове, спутников АЕ и модели при значительном превышении (в несколько раз) абсолютных значений концентрации ионов водорода над Харьковом. Это отличие объясняется, по-видимому, разными значениями потока  $F_{10,7}$  для сравниваемых результатов.

Проведенные сравнения продемонстрировали возможности харьковского радара НР в исследовании внешней ионосферы (до высот  $\sim 1300$  км) Восточно-Европейского региона Земли. Результаты измерений в Харькове удачно восполняют пробел в информации, получаемой главным образом с помощью радаров Американского континента. Они были использованы для тестирования современных моделей внешней ионосферы, в том числе модели FLIP [16].

Работы выполнены при поддержке гранта ННФ (США) АТМ-97-14638 Массачусетскому Технологическому институту (МТИ), США, и Субконтракта МТИ с Институтом ионосферы № 4500105160.

1. Таран В.И. Исследование ионосферы в естественном и искусственно возмущенном состояниях методом некогерентного рассеяния // Геомагнетизм и аэронавигация. 2001. Т. 41. № 5. С. 659–666.
2. Таран В.И. Исследование ионосферы с помощью радаров некогерентного рассеяния в Харькове // Вест. Харьков. гос. политехн. ун-та. 1999. Вып. 31. С. 3–9.

3. Пуляев В.А. Обработка и представление данных некогерентного рассеяния // Вестн. Харьков. гос. политехн. ун-та. 1999. Вып. 31. С. 84–86.
4. Taran V.I., Dzyubanov D.A., Grigorenko Ye.I., and Lysenko V.N. Calculation of upper atmosphere dynamic characteristics from ionospheric data // 2000 International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory: Conference Proc. Kharkov. Ukraine. 2000. V. 2. P. 633–634.
5. Ho M.C. and Moorcroft D.R. Hydrogen density and proton flux in the topside ionosphere over Arecibo, Puerto Rico, from incoherent scatter observations // Planet. Space Sci. 1971. V. 19. P. 1441–1455.
6. Bailey G.J., Vickrey J.F., and Swartz W.E. The topside ionosphere above Arecibo during summer at sunspot minimum and the influence of an interhemispheric flow of thermal protons // J. Geophys. Res. A. № 9. 1982. V. 87. P. 7557–7567.
7. Кризберг И.А., Тацлин А.В. Ионосфера и плазмосфера. М.: Наука, 1984. 189 с.
8. Erickson P.G. and Swartz W.E. Mid-latitude incoherent scatter observations of helium and hydrogen ions // Geophys. Res. Lett. 1994. V. 21. P. 2745–2754.
9. Naghmooch A.A. and Murthy J.A. A comparative study of H<sup>+</sup> and He<sup>+</sup> at sunspot minimum and sunspot maximum // J. Atmos. and Terr. Phys. 1983. V. 45. № 10. P. 673–682.
10. Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1987. 527 с.
11. Bauer S.J. Hydrogen and helium ions // Annal. de Gophys. 1966. V. 22. № 2. P. 247–254.
12. Geisler J.E. and Bowhill S.A. An investigation of ionosphere-protonosphere coupling // Aeronomy Rep. 1965. V. 5. University of Illinois, Urbana, IL.
13. Graven P.D., Comfort R.H., Richards P.G., and Grebowsky J.M. Comparisons of modeled N<sup>+</sup>, H<sup>+</sup>, and He<sup>+</sup> in the midlatitude ionosphere with mean densities and temperatures from Atmosphere Explorer // J. Geophys. Res. A. 1995. V. 100. № 1. P. 257–268.
14. Richards P.G. and Torr D.D. Seasonal, diurnal, and solar cyclical variations of the limiting H<sup>+</sup> flux in the Earth's topside ionosphere // J. Geophys. Res. A. 1985. V. 90. P. 5261–5268.
15. Боговский В.К., Григоренко Е.И., Таран В.И. Солнечно-циклические вариации концентрации ионов водорода во внешней ионосфере // 2-я Украинская конференция по перспективным космическим исследованиям: Сб. тезисов. Кацивели, Крым. 22–27 сентября 2002 г. Национальное космическое агентство Украины, Институт космических исследований НАНУ-НКАУ. 2002. С. 49.
16. Erickson P.J., Taran V.I., Foster J.C., Goncharenko L.P., and Gonzales S.A. Simultaneous longitudinal and latitudinal topside light ion variations from Kharkov, Millstone Hill, and Arecibo radar observations. EOS Trans. AGU. 80(46). 1999. Fall Meet., F771, 1999.

**V.I. Taran, Ye.I. Grigorenko. Investigation of hydrogen ion behavior by the incoherent scattering (IS) method. Comparison of Kharkov IS radar results with Arecibo and Millstone Hill radar observations, Atmosphere Explorer space data, and model calculations.**

Kharkov, Arecibo, and Millstone Hill radar measurements of the H<sup>+</sup> ion concentration in the ionosphere (up to the altitudes of 1000–1300 km) are compared for winter and summer conditions, as well as for minimum and maximum solar activity. The altitude and diurnal H<sup>+</sup> ion variations in the ionosphere over the eastern and western hemispheres are shown to be principally similar. A considerable longitudinal effect is found in the relative H<sup>+</sup> ion concentration for the midlatitude Kharkov and Millstone Hill radars. This effect is explained by different *L* parameters and magnetic flux tube volumes because the Earth's geographic and geomagnetic poles do not coincide. The Kharkov radar data are also compared with the Atmosphere Explorer (AE) satellite data and FLIP model calculations for the midlatitude region, day and night local conditions, and minimum solar activity. The comparison demonstrates the similar character of the altitude distribution of H<sup>+</sup> ions and the similar conditions of ionosphere-plasmasphere interaction. At the same time, the Kharkov radar data exceed the AE findings and model calculations. This discrepancy is explained by different helio-geophysical conditions.