

## Математическое моделирование формирования ночных повышений электронной концентрации в F2-области спокойной среднеширотной ионосферы и в плазмосфере Земли

М.А. Князева, А.А. Намгаладзе

Политехнический факультет МГТУ, кафедра физики

**Аннотация.** С помощью глобальной численной модели верхней атмосферы Земли исследована относительная роль термосферного ветра и электромагнитного дрейфа в формировании ночных среднеширотных максимумов электронной концентрации в спокойной среднеширотной F2-области и в плазмосфере Земли. Показано, что термосферный ветер отвечает за возникновение этих максимумов, а электромагнитный дрейф влияет на форму и широтное положение высокоширотных стенок областей повышенной электронной концентрации, которое зависит от величины скорости электромагнитного дрейфа. Установлено, что в широтном положении, форме и структуре этих областей проявляются заметные UT- и MLT-эффекты: среднеширотные ночные максимумы четче видны в северном полушарии вблизи момента 00:00 UT и в южном – вблизи 18:00 UT, при переходе от вечерних часов к послеполуночным эти максимумы смещаются на более низкие широты.

**Abstract.** The relative role of the thermospheric wind and electromagnetic drift in forming the night middle-latitude maxima of the electron density has been investigated for the quiet geomagnetic conditions by using the global numerical upper atmosphere model (UAM). It has been shown that the thermospheric wind creates these maxima, and the electromagnetic drift influences on the form and latitude location of the high-latitude side of the higher electron density regions, the latter depends on the value of the electromagnetic drift velocity. It has been found that appreciable UT- and MLT-effects become apparent in the latitudinal location, form and structure of these regions. The night middle-latitude maxima are clearly seen in the Northern Hemisphere near 00:00 UT and in the Southern Hemisphere – near 18:00 UT. The maxima are shifted to the more low latitudes when getting from the evening hours to the postmidnight ones.

### 1. Введение

Верхняя граница холодной плазменной оболочки Земли – плазмопауза – была обнаружена во время прямых измерений ионной компоненты плазмы на трассе Земля-Луна с помощью ионных ловушек, установленных на первых лунных ракетах в 1959 г. (Грингауз и др., 1960; Gringauz, 1963) и, независимо, при интерпретации результатов наземных наблюдений свистящих атмосфериков в 1963 г. (Carpenter, 1963). В обоих исследованиях фиксировался резкий спад концентраций холодной плазмы на геоцентрических расстояниях порядка  $4R_E$  ( $R_E$  – средний земной радиус).

Область атмосферы Земли от высот  $\sim 1000$  км до плазмопаузы, при переходе через которую концентрация заряженных частиц падает более чем на порядок величины, называется плазмосферой.

Силовые линии геомагнитного поля в плазмосфере замкнуты и, практически, дипольны (рис. 1). Высотные положения нижней границы плазмосферы и плазмопаузы и форма плазмопаузы зависят от геофизических условий.

Плазмосфера содержит ионы ионосферного происхождения: главным образом ионы водорода с небольшой добавкой ионов однократно ионизованного гелия (несколько процентов от концентрации протонов). На дневной стороне под действием ионизирующего солнечного излучения возрастает концентрация плазмы в ионосфере, что приводит к возникновению градиента давления плазмы, направленного вниз, что, в свою очередь, является причиной диффузии плазмы, направленной по силовым линиям геомагнитного поля вверх: из ионосферы в плазмосферу. На ночной стороне источник фотоионизации отсутствует, идут активные процессы рекомбинации, что

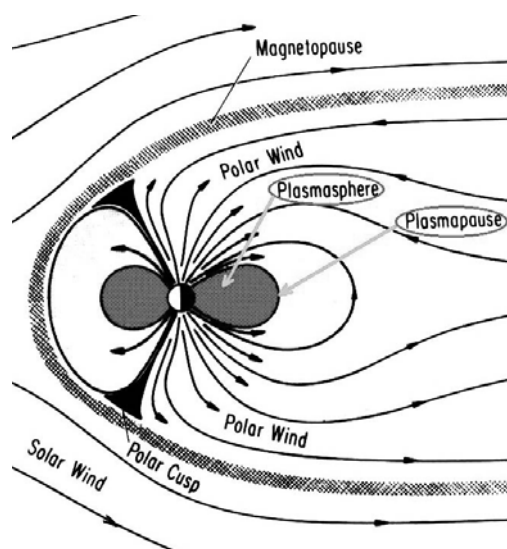


Рис. 1. Схематический вид околоземной плазменной среды

приводит к падению давления плазмы в ионосфере. Под действием ночного градиента давления, противоположного дневному, плазма из плазмосферы опускается вниз, поддерживая ночную ионосферу. Таким образом, плазмосферу можно считать резервуаром, который наполняется днем, а в ночное время опустошается, питая ионосферу.

На рис. 2 приведен по данным спутников DE1 (Chappell, 1988) типичный профиль суммарной ионной концентрации на ночной стороне в зависимости от параметра  $L$  ( $L$  – расстояние до вершины геомагнитной силовой линии в земных радиусах). Характерной особенностью этого профиля является излом вблизи  $L \sim 4$  (колени), показывающий резкий спад суммарной концентрации ионов, обнаруженный Д.Л. Карпентером и К.И. Грингаузом.

Менее изученной особенностью этого профиля является уменьшение скорости падения концентрации ионов перед коленом ( $L \sim 4$ ). Хоровицом и др. (Horwitz et al., 1986) был выполнен статистический анализ профилей концентрации ионов во внешней плазмосфере по данным со спутников DE-1, -2. Результатом является схематическая классификация, приведенная на рис. 3, которая представляет собой возможные типы профиля (Chappell, 1988). Все эти типы имеют более или менее выраженную особенность: либо тип А – уменьшение скорости падения концентрации ионов на  $L \sim 4$ , либо максимумы, просецирующиеся на  $2 \leq L \leq 4$  (один максимум – типы В, D и E, или несколько – тип F). Хоровицом и др. (Horwitz et al., 1986) также отмечено, что "структурированные" профили характерны для вечерней плазмосферы, а наибольшие градиенты плотности плазмы наблюдаются ночью.

Подобные особенности приведенных типов профилей прослеживаются в конкретных измерениях распределения по  $L$ -оболочкам концентраций различных ионов (рис. 4).

В более поздней работе по исследованиям на спутниках GPS и TOPEX (Horvath, Essex, 1999) рассматриваются зависимости ТЕС (TEC – Total

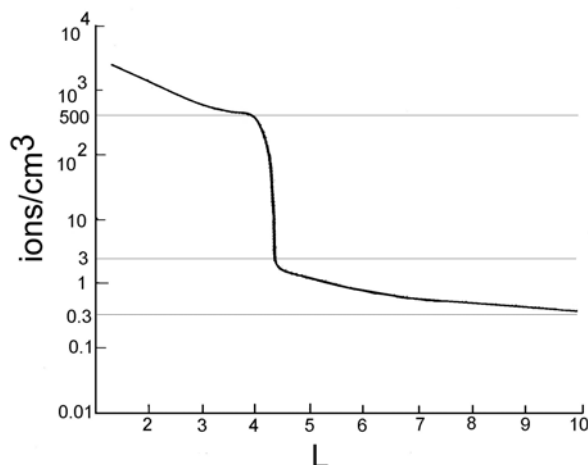


Рис. 2. Типичный профиль ионной концентрации через ночную сторону магнитосферы в зависимости от  $L$ -параметра (Chappell, 1988)

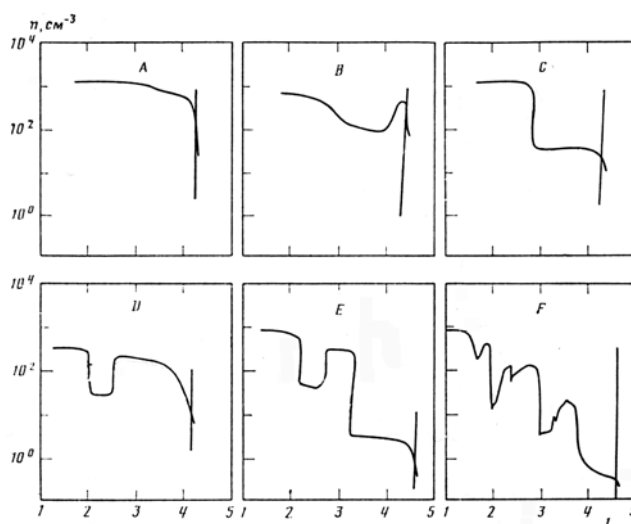
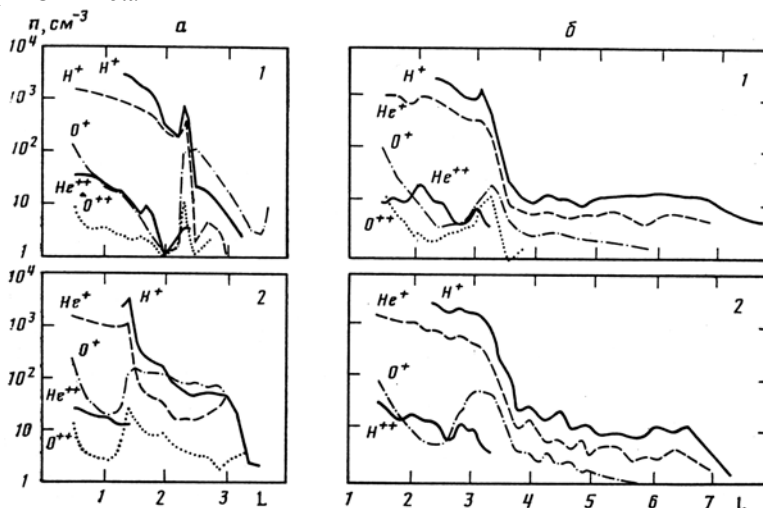


Рис. 3. Схематическая классификация типов распределения концентрации ионов в плазмосфере, вертикальная линия – положение LEIT (LEIT – Low Energy Ion Transition – граница перехода холодных ионов) (из обзора Грингауз, Бассоло, 1990)

Рис. 4. Концентрации различных сортов ионов в зависимости от  $L$  по данным спутника DE-1 в вечернем секторе: а – 12.11.1981 г., 1 – 03.19-03.35 UT, 2 – 09.50-10.21 UT; б – 13.11.1981 г., 1 – 06.17-06.53 UT, 2 – 13.02-13.45 UT (Грингауз, Бассоло, 1990)



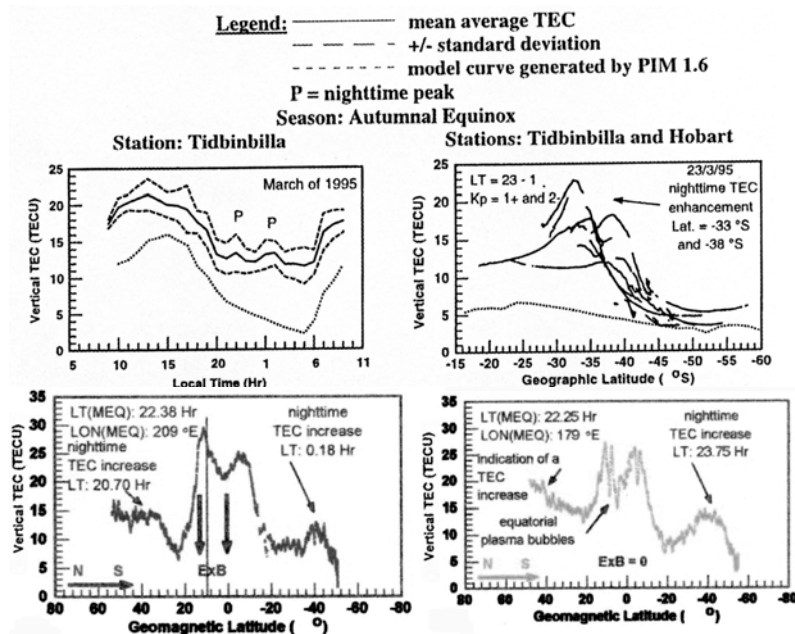


Рис. 5. Средняя за март 1995 г. зависимость вертикального полного электронного содержания (ТЕС) от местного времени (левая панель) и от географической широты (правая панель) для осеннего равноденствия. Сплошная линия – усредненные экспериментальные данные со спутников GPS, короткий пунктир – модельные расчеты с помощью модели PIM 1.6 (Horvath, Essex, 1999)

Рис. 6. Зависимость вертикального электронного содержания (ТЕС) от геомагнитной широты для 23 апреля 1995 г., по данным со спутников TOPEX (Horvath, Essex, 1999)

Electron Content – полное электронное содержание в вертикальном столбе единичного сечения) от магнитной широты для спокойных геомагнитных условий (март 1995 – февраль 1996) (рис. 5, 6), в которых также отмечаются появления пиков на ночных профилях на средних широтах ( $\varphi \sim \pm 40^\circ$ ). Физические процессы, отвечающие за формирование среднеширотных ночных пиков, объясняются в терминах плазмосферно-ионосферного взаимодействия и направленного на запад электрического поля.

В низкоширотной ионосфере имеет место экваториальная аномалия, состоящая в том, что в широтном ходе дневных значений максимума F2-слоя имеется два гребня по обе стороны от магнитного экватора, центрированных на  $\pm(15^\circ-20^\circ)$  магнитной широты, вместо одного на географическом экваторе, ожидаемого по простой теории Чепмена. Суть механизма формирования экваториальной аномалии заключается в том, что плазма поднимается вверх над магнитным экватором посредством  $\mathbf{E} \times \mathbf{V}$  дрейфа, вызванного направленным на восток электрическим полем, на высоты, где преобладает диффузия. Отсюда под действием избыточного давления накопившейся сверху плазмы она растекается в стороны от магнитного экватора, туда, где магнитное поле имеет отличную от нуля вертикальную составляющую и где плазма стекает вниз по силовым линиям геомагнитного поля, формируя гребни аномалии (такое движение плазмы называют фонтан-эффектом). Диффузионное растекание в стороны от экватора и вниз имеет место и в отсутствие электрического поля, но электромагнитный дрейф способствует дополнительному выносу плазмы из области над экватором, поскольку переносит ее на высоты, где диффузия идет быстрее. Сброс основной массы плазмы происходит на силовых линиях, концы которых расположены дальше от экватора, чем в отсутствие дрейфа. Соответственно области, куда поступает плазма, – гребни аномалии – отодвигаются от экватора.

Различие между географическим и геомагнитным экваторами приводит к различным соотношениям между скоростями образования и переноса плазмы в различных долготных секторах, а также к асимметрии гребней аномалии (Брюнелли, Намгаладзе, 1988).

Помимо электромагнитного дрейфа, вертикальный перенос плазмы возможен также и путем нейтральных термосферных ветров. Нейтральный газ растекается во все стороны из дневного полушария в ночное от области повышенного давления, обусловленного солнечным разогревом. Днем ветер дует преимущественно к полюсам, ночью – к экватору. Нейтральный газ в столкновениях передает горизонтальный импульс заряженным компонентам атмосферы, которые, в свою очередь, могут беспрепятственно двигаться вдоль силовых линий геомагнитного поля. Вектор полученной в столкновении скорости имеет составляющую вдоль магнитного поля: на дневной стороне эта составляющая имеет направление вниз по силовой линии, на ночной стороне – вверх. Максимальный вклад в вертикальный перенос нейтральный ветер имеет, когда электрическое поле меняет свой знак: с направления на восток на направление на запад (скорость дрейфа  $\mathbf{E} \times \mathbf{V}$  становится равной нулю).

При смене знака скорости дрейфа  $\mathbf{E} \times \mathbf{V}$  прямой плазменный фонтан меняется на обратный, когда плазма начинает дрейфовать вниз поперек магнитных силовых линий, что приводит к разрушению экваториальной аномалии. Хорватц и Эссекс (Horvath, Essex, 1999) предполагают, что перемена направления электрического поля с восточного на западное наблюдается не только над магнитным

экватором, но также и на средних широтах. Это приводит к перемещению плазмы поперек магнитного поля со среднеширотных силовых трубок на более низкоширотные и на более низкие высоты, результатом чего являются ночные среднеширотные увеличения (пики) ТЕС. Нейтральный ветер в комбинации с магнитным склонением определяет асимметрию полушарий, степень развития и сильную долготную зависимость рассматриваемых пиков.

Области повышенной электронной концентрации в силовых трубках геомагнитного поля проявляются и в суточных вариациях NmF2 (рис. 7), статистический анализ которых представлен в работе (Mikhailov *et al.*, 2000) для широтной цепи из четырех ионозондных станций в евроазиатском долготном секторе. Авторами были рассмотрены все доступные наблюдения foF2 для годов максимума и минимума солнечной активности, на основе которых установлены время возникновения, амплитуды и сезонные вариации двух ночных пиков в NmF2: предполуночного (1-ый пик на рис. 7) и постполуночного (2-ой пик на рис. 7).

В качестве предполагаемого механизма формирования обоих пиков авторами рассматривается комбинация доминирующего в ночное время термосферного меридионального ветра и направленного вниз дрейфа: имея перед полночью направление к экватору, ветер вблизи полуночи меняет направление на противоположное, в то время как направленный вниз дрейф увеличивает рекомбинационные процессы, увеличивающие провалы, окаймленные пиками.

В последних двух работах (Horvath, Essex, 1999; Mikhailov *et al.*, 2000) попытки теоретической интерпретации механизма формирования среднеширотных ночных максимумов имеют качественный характер. В настоящей работе нами проведено количественное исследование, целью которого являлось определение ролей термосферного ветра и электромагнитного дрейфа  $E \times B$  в формировании рассматриваемых максимумов в электронной концентрации на высотах F2-области и плазмосферы Земли (имеющиеся пики в широтном ходе ТЕС и в суточных вариациях NmF2 должны иметь отражение и в распределении электронной концентрации в плазмосфере).

В качестве метода количественной оценки этого явления использовалось моделирование с помощью глобальной численной модели верхней атмосферы Земли (UAM – Upper Atmosphere Model) (Namgaladze *et al.*, 1998). Данная модель описывает термосферу, ионосферу и плазмосферу Земли как единую систему посредством численного интегрирования соответствующих нестационарных трехмерных уравнений непрерывности, движения и теплового баланса для нейтрального, ионного и электронного газов совместно с уравнением для потенциала электрического поля. UAM охватывает диапазон высот от 60 км до  $15R_E$  геоцентрического расстояния и учитывает несовпадение геомагнитного и географических полюсов. Модель позволяет рассчитывать термосферный ветер, плотности и температуры электронов и различных сортов ионов и нейтральных атомов и молекул в термосфере, ионосфере и плазмосфере, магнитосферные электрические поля и электрические поля динамо происхождения.

В блоке нейтральной атмосферы и нижней ионосферы (области E и F1), охватывающем диапазон высот от 80 до 520 км, используется сферическая геомагнитная система координат (область "шара"), в блоке ионосферной F2-области и плазмосферы, охватывающем диапазон высот от 175 км до  $15R_E$ , используется геомагнитная дипольная система координат (область "трубки").

При численном интегрировании нестационарных трехмерных уравнений шаги по координатам и времени являются переменными (см. ниже).

Параметры термосферы могут рассчитываться двумя способами: с использованием эмпирической модели MSISE (в настоящей работе расчеты проводятся с MSISE-2000) и с теоретической моделью, когда в качестве начальных и нижних граничных условий используется MSISE, а расчет параметров термосферы осуществляется численным интегрированием соответствующих уравнений для нейтральных компонент.

Модель верхней атмосферы Земли также позволяет варьировать с комбинациями процессов: отключать или подключать термосферный ветер, электромагнитный дрейф, динамо-поле и т.д.

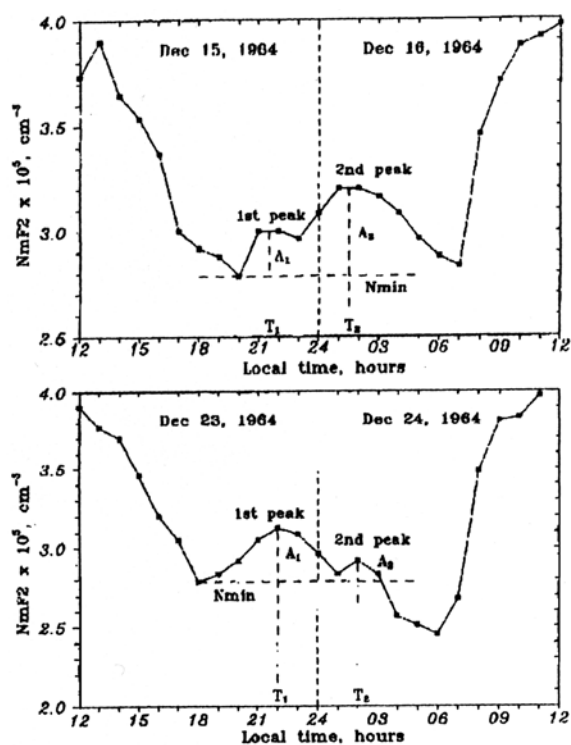


Рис. 7. Средняя статистическая зависимость концентрации электронов в максимуме F2-слоя от местного времени (Mikhailov *et al.*, 2000)

В настоящей работе проанализированы модельные расчеты концентрации электронов, выполненные в 4 вариантах: 1) с термосферным ветром и дрейфом  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ; 2) с ветром, но без дрейфа; 3) без термосферного ветра, но с дрейфом; 4) без ветра и дрейфа. Целью анализа является оценка относительной роли ветра и дрейфа в формировании ночных среднеширотных максимумов в электронной концентрации для спокойных геомагнитных условий при высокой солнечной активности.

## 2. Модельные расчеты

Модельные расчеты проводились для условий равноденствия при высокой солнечной активности (14-16 апреля 2002 г.) с использованием эмпирической модели MSISE-2000 во всех 4-х вариантах.

Численная пространственная сетка была построена следующим образом. Шаги интегрирования по высоте переменные: меняются по нарастающей (от 1-3 км на высотах ниже 100 км и до 30 км и более на высотах выше 400 км). Шаги интегрирования по геомагнитной широте также переменные: от  $2^\circ$  до  $5^\circ$  для области "трубки" и от  $2^\circ$  до  $10^\circ$  для области "шара" (со сгущением сетки вблизи авроральной зоны). Шаг интегрирования по геомагнитной долготе постоянный ( $15^\circ$ ).

Шаги интегрирования по времени постоянны: для области "шара" – 4 минуты, для области "трубки" – 2 минуты.

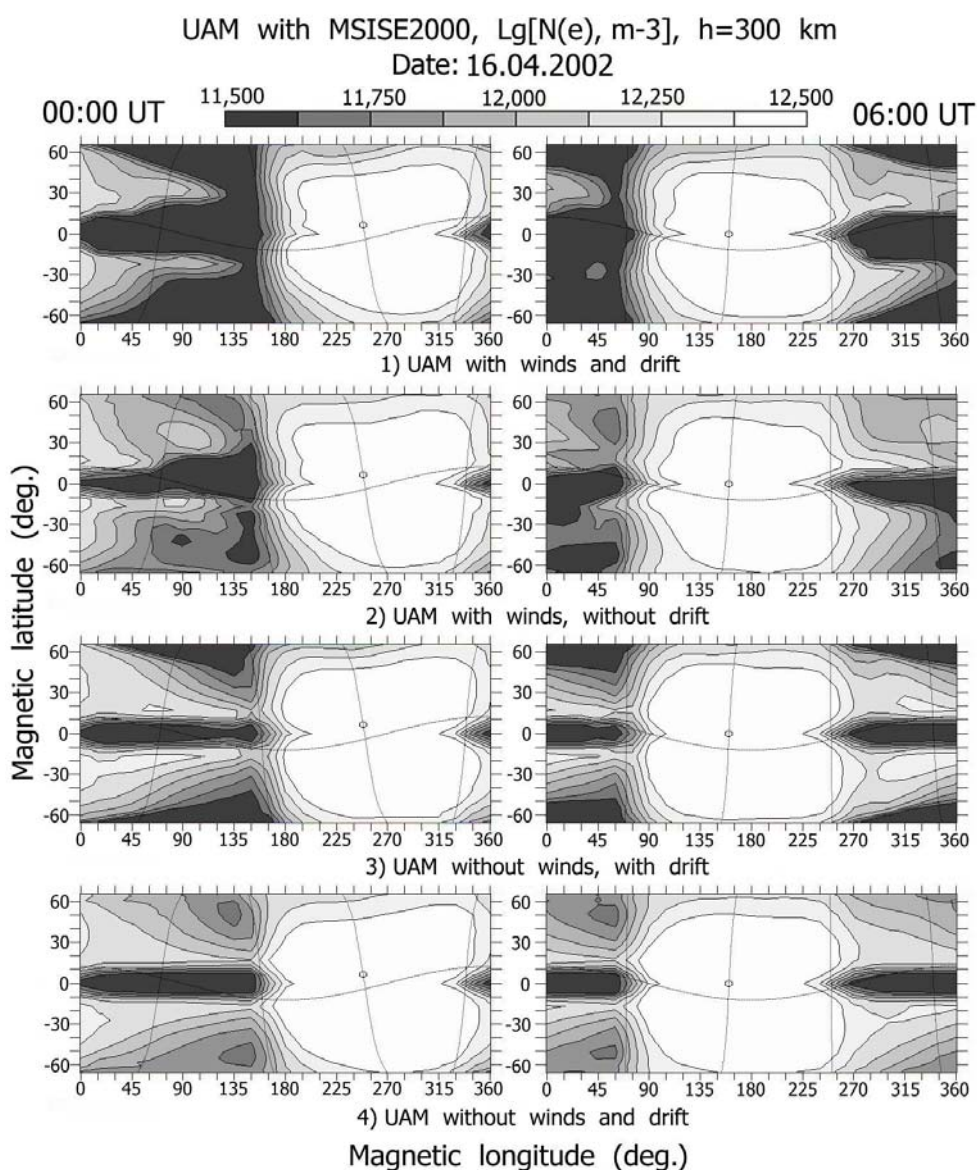


Рис. 8.1. Рассчитанные широтно-долготные распределения  $Lg(Ne, m^{-3})$  для 00:00 и 06:00 UT на высоте 300 км (варианты расчетов 1-4 сверху вниз)

За начальные условия выбрано состояние на момент времени 24:00 UT 31 марта 2001 г., так как данная дата по гелио- и геофизическим условиям близка к моделируемым дням.

Процесс отключения термосферного ветра в UAM соответствует модельному расчету, в котором не решаются уравнения движения нейтрального газа, а в другие уравнения, куда входит скорость термосферного ветра, она полагается равной нулю.

Аналогично осуществляется процесс отключения электромагнитного дрейфа – во всех уравнениях, куда входит электрическое поле, оно полагается равным нулю.

Для анализа модельных расчетов для всех 4-х вариантов расчетов и моделируемых дней были построены глобальные карты распределения концентрации электронов на высоте 300 км.

На рис. 8.1 и рис. 8.2 построены глобальные распределения  $LgNe$  в геомагнитных координатах на высоте 300 км для четырех моментов времени 00:00, 06:00, 12:00 и 18:00 UT, соответствующие вариантам расчетов 1-4 (сверху вниз). На картах отмечены положение подсолнечной точки (кружком с точкой), полуденно-полуночный географический меридиан, линия терминатора и географический экватор.

Среднеширотные ночные максимумы хорошо видны на картах, соответствующих вариантам расчетов 1 и 2 с термосферным ветром (две самые верхние панели). Лучше всего максимумы просматриваются для моментов времени 00:00, 12:00 и 18:00 UT, хуже всего для 06:00 UT. Заметна

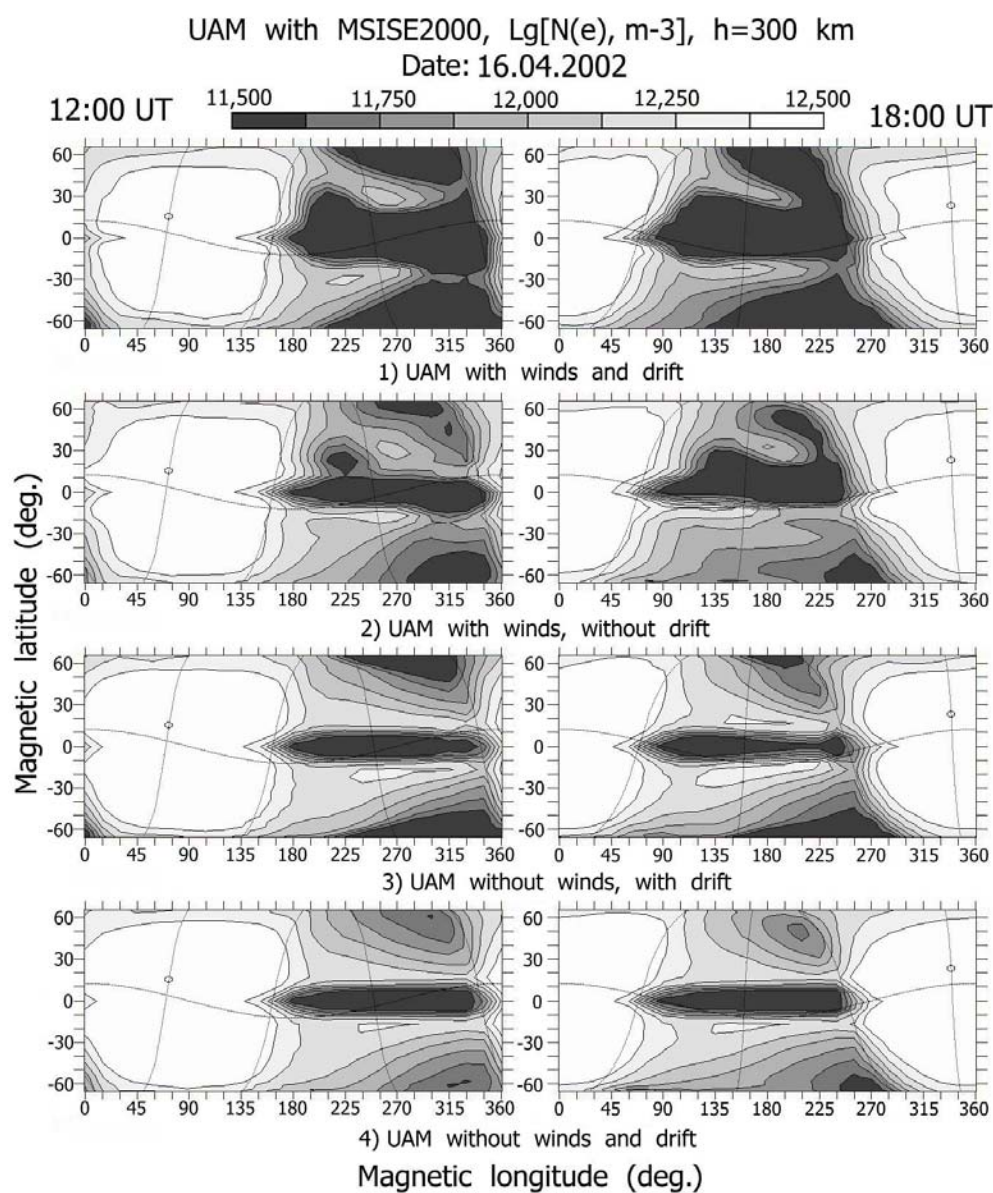


Рис. 8.2. Рассчитанные широтно-долготные распределения  $Lg(Ne, m^{-3})$  для 12:00 и 18:00 UT на высоте 300 км (варианты расчетов 1-4 сверху вниз)

асимметрия между северным и южным полушариями: в северном рассматриваемые области повышенной электронной концентрации четче видны, чем в южном. Для моментов времени 00:00 и 18:00 UT в северном полушарии среднеширотные ночные максимумы смещены от геомагнитного экватора ближе к полюсу (среднее по указанным моментам времени расположение в северном полушарии около 40° геомагнитной широты, в южном – 25°-30°). Для момента 06:00 UT – наоборот (в северном – 25° геомагнитной широты, в южном – 35°). Для момента времени 12:00 UT для расчета 1 с ветром и дрейфом – их широтное положение почти симметрично (около 30° геомагнитной широты для обоих полушарий).

Характерной особенностью среднеширотных областей повышенной электронной концентрации является их вытянутость по долготе. Отчётливо видна зависимость от местного времени (MLT-вариация), которая проявляется в смещении рассматриваемых областей повышенной электронной концентрации с геомагнитных широт 45°-50° на широты 20°-25° при переходе от вечерних часов к послеполуночным.

Различия в широтном положении, форме и структуре среднеширотных ночных максимумов в различные моменты UT позволяют сделать вывод об их сильной зависимости от мирового времени, то есть о наличии UT-эффекта, связанного с несовпадением географического и геомагнитного полюсов.

В вариантах расчета без ветров (3, 4) среднеширотные максимумы отсутствуют и слабо выражена UT-зависимость.

Наличие электромагнитного дрейфа принципиально на среднеширотные максимумы электронной концентрации не влияет. При сравнении вариантов расчета 1 и 2 (оба с ветром, отличаются

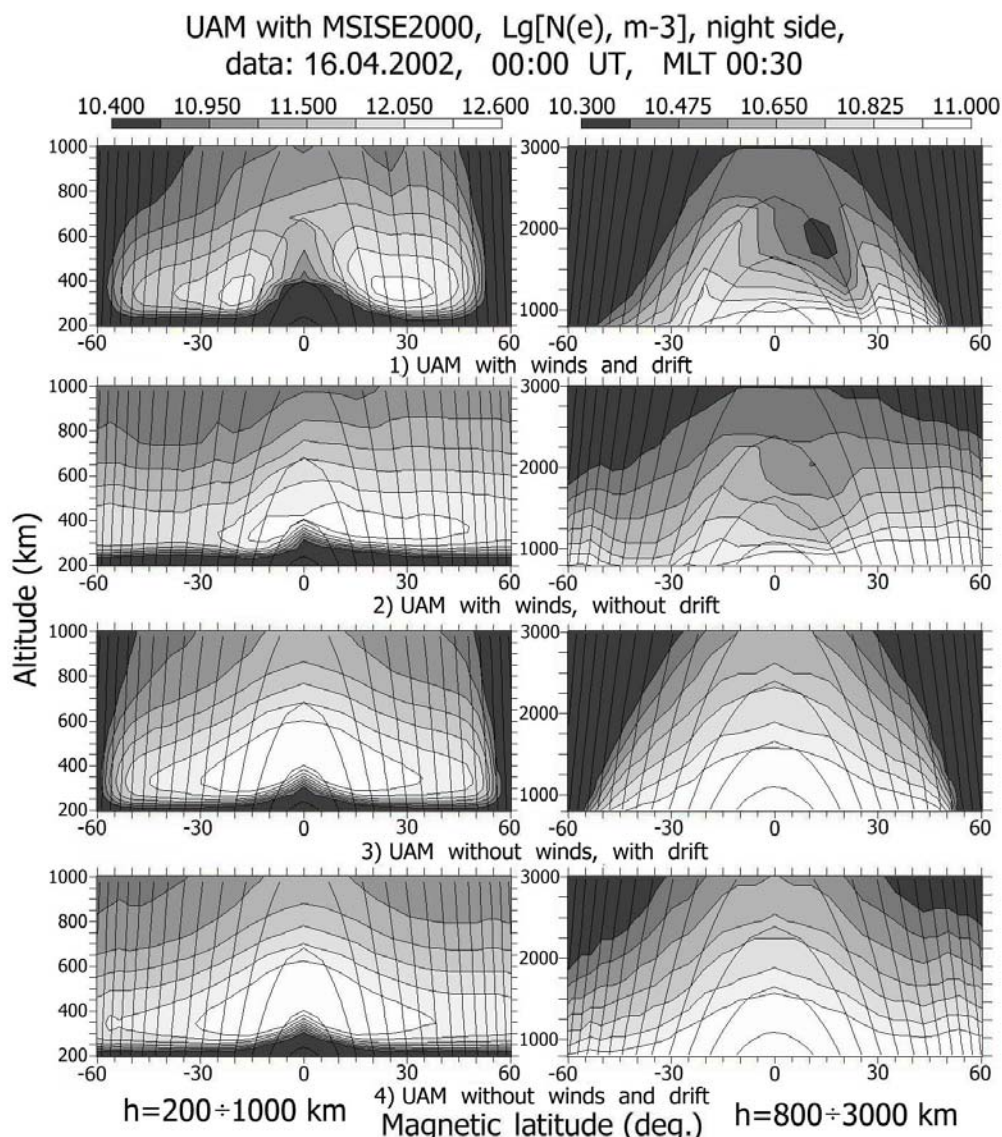


Рис. 9. Рассчитанные высотно-широтные распределения  $Lg(Ne, m^{-3})$  вдоль магнитного меридиана MLT = 00:30 для 00:00 UT для диапазонов высот  $h = 200 \div 1000$  км (слева) и  $h = 800 \div 3000$  км (справа) (варианты расчетов 1-4 сверху вниз)

наличием дрейфа) видно, что в варианте с дрейфом (1) рассматриваемые области имеют более сглаженные контуры и меньше неоднородностей, т.е. дрейф в основном влияет на форму среднеширотных максимумов, в частности, определяет положение и крутизну приполюсных "стенки" областей повышенной электронной концентрации, не являясь причиной возникновения этих областей.

Для оценки высотных размеров областей повышенной электронной концентрации, контролируемых магнитным полем Земли, были выбраны и построены ночные широтно-высотные меридиональные разрезы LgNe (рис. 9) для момента 00:00 UT 16 апреля 2002 г. на магнитном меридиане MLT 00:30. На рис. 9 меридиональные разрезы представлены для двух перекрывающихся диапазонов высот: от 200 до 1000 км и от 800 до 3000 км. На разрезах нанесены силовые линии геомагнитного поля.

В расчетах без ветров (варианты 3, 4 – нижние панели на рис. 9) распределение электронной концентрации в обоих диапазонах высот имеет куполообразную форму (максимум проецируется на экватор).

В расчете с ветрами, но без электромагнитного дрейфа (вариант 2) среднеширотные ночные максимумы, отмеченные на глобальных картах распределения LgNe на высоте 300 км, проявляются в виде областей повышенной электронной концентрации, ориентированных по геомагнитному полю. Эти области на меридиональных разрезах для обоих диапазонов высот представляют собой выступы изолиний электронов: в

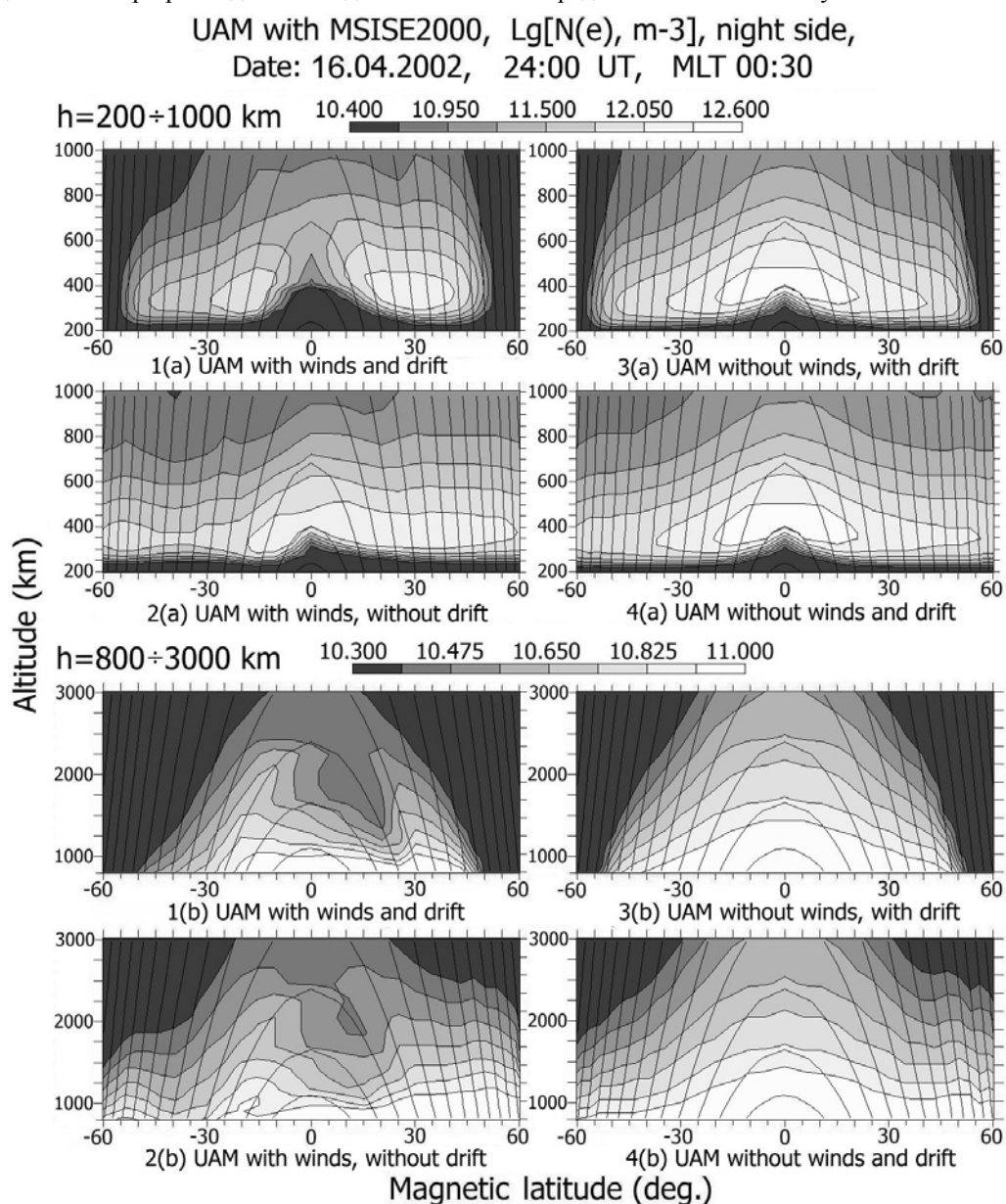


Рис. 10. Рассчитанные высотно-широтные распределения Lg (Ne, m<sup>-3</sup>) вдоль магнитного меридиана MLT = 00:30 для 24:00 UT для диапазонов высот 200÷1000 км (2 верхние панели) и 800÷3000 км (2 нижние панели). Варианты 1-4 отличаются комбинацией ветра и дрейфа и начальными условиями (см. в тексте)



северном полушарии один широкий выступ, растянутый по геомагнитной широте (от 30° до 60° геомагнитной широты), в южном – два выступа, проецирующихся на широты порядка 25°÷30° и 55°÷60°. В высоту по силовым линиям геомагнитного поля эти выступы достигают как минимум 2500 км. Масштаб рисунка не позволяет проследить до каких предельных высот протягиваются области повышенной электронной концентрации, так как значения концентрации на больших высотах слишком малы, но анализ численных результатов показывает, что эти области проникают в плазмосферу до высот ~ 8000 км.

В расчете с ветрами и дрейфом (вариант 1), эффект электромагнитного дрейфа проявляется в поджимании изолинии с полюсов, что приводит к сжатию выступа в северном полушарии и исчезновению высокоширотного выступа в южном, и увеличению глубины провала (первая панель, правый разрез на рис. 9), окаймленного этими выступами областей повышенной электронной концентрации.

На меридиональных разрезах в вариантах без ветров (3, 4) подобные области отсутствуют.

Таким образом, наличие дрейфа в расчете с ветром (1) принципиально на области повышенной электронной концентрации не влияет, а только ограничивает их со стороны высоких широт.

Форма выступов контролируется геометрией магнитных силовых линий.

### **3. Исследование зависимости эффектов термосферного ветра и электромагнитного дрейфа от начальных условий**

Для оценки зависимости эффектов термосферного ветра и электромагнитного дрейфа от начальных условий были проведены модельные расчеты еще одних суток (повторение даты 16.04.2002), результаты которых представлены на рис. 10 в виде широтно-высотных меридиональных разрезов LgNe через ночную сторону для момента времени 24:00 UT на магнитном меридиане MLT 00:30 для тех же диапазонов высот. Расчет 1 соответствует прогону даты 16.04.2002 г. с ветром и электромагнитным дрейфом; расчет 2 – продолжение расчета 1, когда повторяется эта же дата, но с отключенным дрейфом; расчет 4 – продолжение расчета 2, когда снова повторяется эта же дата, но вместе с дрейфом отключается и ветер; расчет 3 – продолжение расчета 1 для той же даты, но с отключенным ветром. Таким образом, конец расчета 1 является начальным условием для расчетов 2 и 3, а конец расчета 2 является начальным условием для расчета 4.

Анализ полученных результатов модельных расчетов подтверждает относительную роль термосферного ветра как причины возникновения среднеширотных максимумов электронной концентрации: области повышенной электронной концентрации присутствуют в обоих расчетах с ветрами (1 и 2), а отключение ветра в расчетах 3 и 4 приводит к исчезновению рассматриваемых областей.

Таким образом, начальные условия качественно не влияют на формирование областей повышенной электронной концентрации в модельных расчетах.

### **4. Исследование влияния величины электрического поля на формирование областей повышенной электронной концентрации**

В течение 16.04.2002 г. разность потенциалов через полярную шапку, определяющая величину электрического поля, а, следовательно, и величину скорости электромагнитного дрейфа, не являлась постоянной, а изменялась от 20 кВ (в минимуме) до 60 кВ (в максимуме), согласно данным наблюдения со спутников DMSP, которые были использованы в модели в качестве входных параметров. Для того чтобы оценить влияние величины скорости электромагнитного дрейфа на формирование областей повышенной электронной концентрации, были проведены расчеты для 16.04.2002 г. в 4-х вариантах: 1) с термосферным ветром электромагнитным дрейфом и постоянной разностью потенциалов через полярную шапку 20 кВ; 2) без ветра, но с дрейфом и постоянной разностью потенциалов 20 кВ; 3) с ветром и дрейфом и постоянной разностью потенциалов 60 кВ; 4) без ветра, но с дрейфом и постоянной разностью потенциалов 60 кВ.

На рис. 11 представлены широтно-высотные меридиональные разрезы LgNe через ночную сторону для момента времени 24:00 UT на магнитном меридиане MLT 00:30 для всех вариантов расчета для двух высотных диапазонов: от 200 до 1000 км и от 800 до 3000 км. Левые колонки соответствуют расчетам с постоянной разностью потенциалов 20 кВ, правые – расчетам с постоянной разностью потенциалов 60 кВ.

Как и ранее, области повышенной электронной концентрации отмечаются только в вариантах расчета с ветром (панели 1 на рис. 11.1 и 11.2). При сравнении результатов расчетов с постоянными разностями потенциалов 20 кВ и 60 кВ видно, что, чем электрическое поле сильнее, тем больше проявляются эффекты электромагнитного дрейфа: усиление сжимания изолиний с полюсов (на всех панелях правых колонок степень сжатия выше, чем на левых панелях), а на разрезах для  $h = 800\div 3000$  км для расчета с ветром (панель 1 на рис. 11.2) увеличивается глубина провала, окаймленного выступами областей повышенной электронной концентрации (концентрация электронов и высотное положение этих областей на правом разрезе ниже, чем на левом).

Таким образом, наличие и величина дрейфа влияет только на форму областей повышенной электронной концентрации: их широтную протяженность и высоту, до которой они протягиваются.

### 5. Предполагаемый механизм формирования областей повышенной электронной концентрации на ночной стороне

Диапазон высот от 200 до 1000 км охватывает область F2 ионосферы, образующуюся под действием солнечного ультрафиолетового излучения в диапазоне длин волн  $100 < \lambda < 900 \text{ \AA}$ , ионизирующего в основном атомарный кислород:



Ион  $\text{O}^+$  является преобладающим ионом в F2-области. Прямая рекомбинация ионов  $\text{O}^+$  идет очень медленно, поэтому основным механизмом их исчезновения является двухступенчатый процесс: сначала переработка ионов  $\text{O}^+$  в молекулярные ионы посредством ионно-молекулярных реакций с  $\text{O}_2$  и  $\text{N}_2$ :



а затем – быстрая диссоциативная рекомбинация образовавшихся молекулярных ионов:

UAM with MSISE2000,  $\text{Lg}[\text{N}(\text{e}), \text{m}^{-3}]$ , night side,  
Date: 16.04.2002, 24:00 UT, MLT 00:30

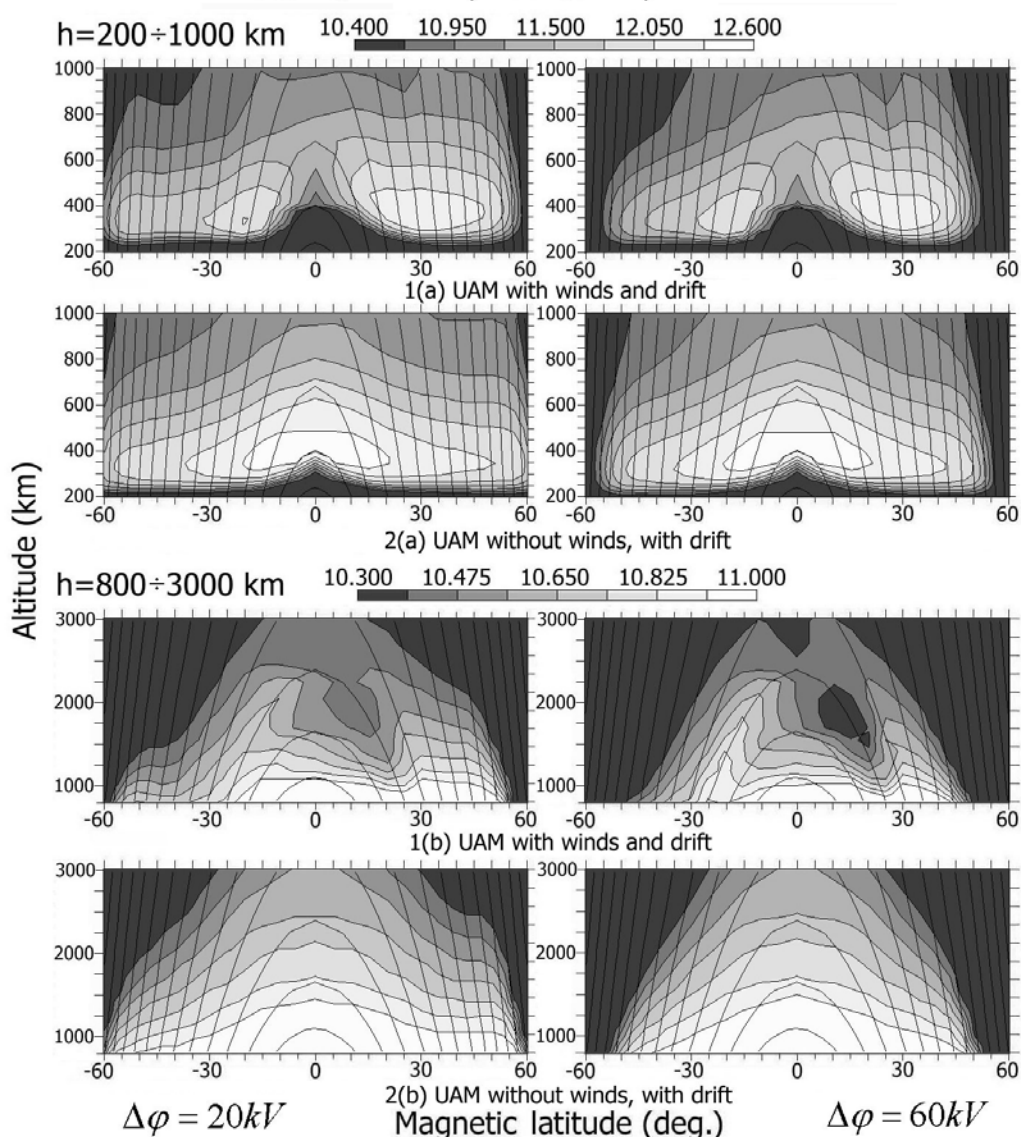
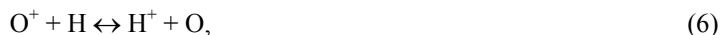


Рис. 11. Рассчитанные высотно-широтные распределения  $\text{Lg}(\text{N}_e, \text{m}^{-3})$  вдоль магнитного меридиана MLT = 00:30 для 24:00 UT для диапазонов высот 200÷1000 км (2 верхние панели) и 800÷3000 км (2 нижние панели). Варианты 1-4 отличаются комбинацией ветра и дрейфа и значением постоянной разности потенциалов через полярную шапку)



На высотах F2-области плазма является полностью замагниченной. Разность в скоростях электронов и ионов невелика, что позволяет рассматривать их движение как амбиполярное. Под действием вертикального градиента парциального давления плазмы ионы и электроны, удерживаемые вместе внутренним поляризационным электрическим полем, могут беспрепятственно двигаться вдоль силовых линий магнитного поля. Скорость такого движения (амбиполярной диффузии) имеет в случае наклоненного к земной поверхности магнитного поля вертикальную составляющую, направленную днем вверх на высотах выше максимума F2-области.

На высотах порядка 500 км начинается процесс переработки ионов  $\text{O}^+$  в  $\text{H}^+$  (основной компонент плазмосферы) в реакциях перезарядки (6):



образующиеся ионы  $\text{H}^+$  поднимаются вверх в плазмосферу, заполняя ее на дневной стороне ионосферной плазмой. Таким образом, плазмосфера становится резервуаром, питающим ионосферу в ночное время, поскольку на ночной стороне в связи с отсутствием солнечного излучения и преобладанием процессов рекомбинации ионосфера обедняется ионами и электронами, что приводит к смене знака градиента давления плазмы, который теперь вызывает движение плазмы вниз по силовым линиям геомагнитного поля: из плазмосферы в ионосферу. Ионы  $\text{H}^+$  перерабатываются в реакциях перезарядки (6) в ионы  $\text{O}^+$ , которые поддерживают убывающую концентрацию плазмы в ночной ионосфере.

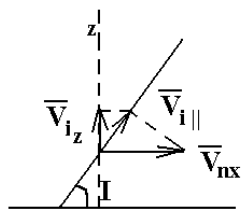


Рис. 12

Помимо амбиполярной диффузии на движение плазмы вдоль силовых линий геомагнитного поля оказывает влияние термосферный ветер. Движущиеся горизонтально нейтральные атомы и молекулы в столкновениях сообщают замагниченным ионам продольную (вдоль магнитного поля) составляющую своей скорости (рис. 12). Вертикальная составляющая скорости ионов, добавляемая к скорости амбиполярной диффузии, в этом случае будет:

$$V_{iz} \sim V_{i\parallel} \sin I \sim V_{ix} \cos I \sin I,$$

где  $I$  – наклонение магнитного поля.

Направление этой дополнительной (ветровой) вертикальной составляющей скорости ионов зависит, таким образом, от комбинации наклонения магнитного поля и направления термосферного ветра.

В термосфере нейтральный газ, разогретый солнечным излучением на дневной стороне, растекается в горизонтальной плоскости во все стороны из дневного полушария в ночное. Днем термосферный ветер дует преимущественно к полюсам, ночью – к экватору. Следовательно, на дневной стороне термосферный ветер сообщает плазме вертикальную составляющую скорости, направленную вниз, а ночью – наоборот, вверх.

Таким образом, на ночной стороне действуют два процесса переноса плазмы: диффузионное опускание из плазмосферы в ионосферу и поднятие за счет термосферного ветра, что приводит к увеличению концентрации электронов в области максимума F2-слоя за счет поступления плазмы из плазмосферы и поддержания максимума F2-слоя на достаточно больших высотах со сравнительно невысокой скоростью потерь ионов.

Максимум второго эффекта обуславливается максимумом вертикальной составляющей ионной скорости, который, согласно приведенной формуле, приходится на геомагнитные широты  $\sim 45^\circ$  при  $V_{ix} = \text{const}$ .

В зависимости от геомагнитных условий и UT положение максимума может меняться в пределах  $30^\circ$ - $55^\circ$ , так как от этих условий зависит широтный ход термосферного ветра. Соответственно, будет изменяться положение областей повышенной электронной концентрации.

Электромагнитный дрейф также добавляет вертикальную составляющую скорости к диффузионной и ветровой. Электрическое поле, направленное на восток, вызывает дрейф плазмы вверх, а поле, направленное на запад, – дрейф плазмы вниз. Но вертикальный перенос плазмы за счет электромагнитного дрейфа в высоких и субавроральных широтах имеет меньше значения, чем горизонтальный, так как при увеличении геомагнитной широты скорость дрейфа становится практически горизонтальной из-за вертикальности магнитного поля. Замагниченная плазма на высотах F2-области участвует в дрейфовом движении под действием электрических полей магнитосферной конвекции и коротации. На вечерней стороне эти два электрических поля оказываются противоположно направленными, что приводит к застою плазмы на вечерней стороне и медленному движению на ночной, где она активно рекомбинирует. Этот механизм формирует главный ионосферный провал на высоких и субавроральных широтах, экваториальная стенка которого становится высокоширотной стенкой областей повышенной электронной концентрации (Брунелли, Намгаладзе, 1988). В этом и состоит влияние  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  дрейфа на форму широтной вариации областей повышенной электронной концентрации.

## 6. Выводы

В работе проанализированы модельные расчеты электронной концентрации для условий равноденствия при высокой солнечной активности (14-16 апреля 2002 г.), выполненные с помощью глобальной численной модели верхней атмосферы Земли UAM (Namgaladze et al., 1998), позволяющей рассчитывать параметры термосферы, ионосферы и плазмосферы Земли как единой системы.

Для оценки относительной роли термосферного ветра и электромагнитного дрейфа в формировании ночных среднеширотных максимумов в электронной концентрации для спокойных геомагнитных условий были выполнены модельные расчеты в 4-х вариантах комбинаций наличия и отсутствия термосферного ветра и дрейфа с различными начальными условиями и параметрами электрического поля (расчеты с постоянными разностями потенциалов через полярную шапку 20 кВ и 60 кВ). Параметры термосферы рассчитывались с использованием эмпирической модели MSISE-2000.

Установлено, что ночные среднеширотные области повышенной электронной концентрации формируются только в вариантах расчетов с термосферным ветром. Эти области протягиваются в плазмосферу вдоль магнитных силовых линий до высот порядка 8000 км.

Начальные условия качественно не влияют на формирование описываемых областей.

Проявляется UT-эффект: сильная зависимость от мирового времени в широтном положении, форме и структуре этих областей, и MLT-эффект: их смещение на более низкие широты при переходе от вечерних часов к послеполуночным.

Наличие и величина скорости электромагнитного дрейфа влияют на среднеширотные максимумы электронной концентрации следующим образом: дрейф поджимает к экватору высокоширотную стенку областей повышенной электронной концентрации. Степень поджатия пропорциональна величине скорости электромагнитного дрейфа.

Предполагаемый механизм формирования этих областей на ночной стороне основан на термосферно-ионосферно-плазмосферном взаимодействии.

На ночной стороне диффузионное опускание плазмы из плазмосферы в ионосферу и ее поднятие за счет термосферного ветра увеличивает концентрацию электронов в области максимума F2-слоя.

Максимум эффекта термосферного ветра обуславливается максимумом вертикальной составляющей ионной скорости, который приходится на геомагнитные широты порядка 45° при постоянной меридиональной составляющей скорости ветра (в зависимости от геомагнитных условий и UT-положение максимума может меняться в пределах 30°-55°).

Влияние горизонтального дрейфового движения  $\mathbf{E} \times \mathbf{V}$  приводит к резкому падению концентрации плазмы на ночной стороне на высоких и субавроральных широтах (главный ионосферный провал). Экваториальная стенка этого провала становится высокоширотной стенкой областей повышенной электронной концентрации, широтное положение которой зависит от величины скорости электромагнитного дрейфа, что и было установлено при анализе результатов модельных расчетов.

Работа поддержана грантом РФФИ № 05-05-97511.

## Литература

- Carpenter D.L.** Whistler evidence of a "knee" in the magnetospheric ionization density profile. *Res. Geophys.*, v.68, p.1675, 1963.
- Chappell C.R.** The terrestrial plasma source: A new perspective in solar-terrestrial processes from Dynamics Explorer. *Res. Geophys.*, v.26, p.229, 1988.
- Gringauz K.I.** The structure of the ionized gas envelope of Earth from direct measurements in the USSR of local charged particle concentration. *Planet. Space Sci.*, v.11, p.281, 1963.
- Horvath I., Essex E.A.** Using observations from the GPS and TOPEX satellites to investigate night-time TEC enhancements at mid-latitudes in the Southern Hemisphere during a low sunspot number period. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v.62, p.371, 1999.
- Horwitz J.L., Mentee S., Turnley J., Burch J.L., Winningham J.D., Chappell C.R., Craven J.D., Frank L.A., Slater D.W.** Plasma boundaries in the inner magnetosphere. *Res. Geophys.*, v.91, p.8861, 1986.
- Mikhailov A.V., Leschinskaya T.Yu., Förster M.** Morphology of NmF2 nighttime increases in the Eurasian sector. *Annales Geophysicae*, v.18, p.618, 2000.
- Namgaladze A.A., Martynenko O.V., Volkov M.A., Namgaladze A.N., Yurik R.Yu.** High-latitude version of the global numerical model of the Earth's upper atmosphere. *Proceedings of the MSTU*, v.1, N 2, p.23-84, 1998.
- Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А.** Физика ионосферы. *М., Наука*, 528 с., 1988.
- Грингауз К.И., Бассоло В.С.** Структура и свойства плазмосферы Земли. Экспериментальные данные и проблемы их интерпретации. Обзор. *Геомагнетизм и аэрономия*, т.30, № 1, с.1-17, 1990.
- Грингауз К.И., Курт В.Г., Мороз В.И., Шкловский И.С.** Ионизованный газ и быстрые электроны в окрестности Земли и в межпланетном пространстве. *Докл. АН СССР*, т.132, с.1062, 1960.