

УДК 550.388.2

## МЕХАНИЗМЫ РАССЛОЕНИЯ $F_2$ -СЛОЯ И ФОРМИРОВАНИЯ $F_3$ -И $G$ -СЛОЕВ В ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ ИОНОСФЕРЕ

© 2012 г. М. В. Клименко<sup>1,2</sup>, В. В. Клименко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБУ науки Западное отделение Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, г. Калининград

<sup>2</sup>Калининградский государственный технический университет, г. Калининград  
e-mail: maksim.klimenko@mail.ru

Поступила в редакцию 01.12.2010 г.

После доработки 07.02.2012 г.

Работа посвящена исследованиям механизмов формирования дополнительных слоев в экваториальной ионосфере, выполненным с использованием численных экспериментов на Глобальной Самосогласованной Модели Термосферы, Ионосферы и Протоносферы (ГСМ ТИП), модифицированной в части решения уравнения электрического поля в ионосфере Земли. Расчеты проводились для спокойных геомагнитных условий с использованием модели MSIS-90 для расчета параметров термосферы. Полученная при этом пространственно-временная картина термосферной циркуляции и рассчитанные на ее основе вариации динамо электрического поля позволяют воспроизвести эффект расслоения  $F_2$ -слоя и появление  $F_3$ -слоя в экваториальной ионосфере за счет действия неоднородного по высоте зонального электрического поля на геомагнитном экваторе. На основании представленных ранее результатов расчетов на модифицированной модели ГСМ ТИП было предсказано появление максимума в высотном профиле электронной концентрации на высоте  $\sim 1000$  км, образуемого ионами  $H^+$ , который мы назвали  $G$ -слоем. Численные эксперименты показали, что этот слой формируется меридиональной компонентой термосферного ветра и связан с формированием ночного среднеширотного максимума на высотах  $F$ -области ионосферы.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Ионосфера низких широт очень сложна и изменчива. Это связано с геометрией магнитного поля Земли, силовые линии которого вблизи геомагнитного экватора практически горизонтальные. Это приводит к тому, что при построении вертикальных профилей различных ионосферных параметров используется большое число плазменных трубок, приходящих на экватор с различных геомагнитных широт. Такая геометрия способствует формированию неоднородностей различного вида в экваториальной ионосфере. Подробный и полный анализ теоретических и экспериментальных исследований низкоширотной ионосферы можно найти в работах [Anderson, 1973; Rishbeth, 2000]. Однако, несмотря на длительный период исследований и пристальное внимание к низкоширотной, и особенно к экваториальной ионосфере, все еще остается достаточно много нерешенных вопросов, а также явлений и эффектов, которые до сих пор не нашли своего окончательного объяснения. К таким явлениям можно отнести формирование дополнительных слоев в экваториальной ионосфере.

В последние десятилетия вопрос о существовании дополнительных слоев в экваториальной ионосфере время от времени вставал на повестку дня. Одним из первых экспериментальных свиде-

тельств расслоения экваториального  $F_2$ -слоя ионосферы принято считать [Sen, 1949]. В дальнейшем во многих работах были представлены доказательства существования этого явления. Эти доказательства основывались на данных наблюдений станций наземного зондирования ионосферы [Rastogi, 1973; Прутенский, 1985; Lynn et al., 2000], подвижных платформ [Бенькова и др., 1978], радаров некогерентного рассеяния [McClure and Peterson, 1972; Sario et al., 1989] и зондирования ионосферы со спутников [King et al., 1964; Raghavarao and Sivaraman, 1974; Прутенский, 1992]. Во всех этих работах отмечалось наличие выступа в профиле электронной концентрации выше максимума  $F_2$ -слоя, т.е. существование расслоения экваториального  $F_2$ -слоя ионосферы.

Однако, начиная с некоторого момента времени, термин “расслоение” перестал использоваться для идентификации дополнительного максимума в  $F$ -области экваториальной ионосферы. Вначале этот максимум получил ранее использовавшееся название  $G$ -слой [Balan and Bailey, 1995], которое затем сменилось новым названием –  $F_3$ -слой [Balan et al., 1997, 1998; Jenkins et al., 1997; Abdu, 1999; Batista et al., 2002]. В работе [Balan et al., 1997] отмечается, что чаще всего выступления на вертикальном профиле электронной концентрации появляются на широтах  $\pm(5-12)^\circ$  в области

между гребнями экваториальной аномалии на высоте  $\sim 490$  км с 11:40 до 14:30 LT. Существуют также некоторые свидетельства того, что выступ возникает на силовых линиях за гребнями экваториальной аномалии [Raghavarao and Sivaraman, 1974].

Как было показано в публикациях [Balan and Bailey, 1995; Клименко, 2009; Lin et al., 2009], численные модели ионосферы воспроизводят расслоение  $F_2$ -слоя и формирование  $F_3$ -слоя в экваториальной ионосфере, наблюдающиеся в эксперименте. В статье [Клименко и Клименко, 2011] показано, что на высоте  $\sim 1000$  км в экваториальной ионосфере в ночное время в равноденственных условиях ионами  $H^+$  формируется максимум в вертикальном профиле электронной концентрации, который был назван  $G$ -слоем. В данной работе приводятся результаты численных экспериментов, целью которых является объяснение физических механизмов расслоения  $F_2$ -слоя и формирования дополнительных  $F_3$ - и  $G$ -слоев в экваториальной ионосфере.

## 2. ВОЗМОЖНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ СЛОЕВ В ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ ИОНОСФЕРЕ

Первые работы по моделированию расслоения экваториального  $F_2$ -слоя были выполнены в публикациях [Woodman et al., 1972; Huang, 1974, 1975]. В этих работах не исследовались механизмы формирования расслоения экваториального  $F_2$ -слоя, а лишь была показана возможность его воспроизведения на простых численных моделях и сделано предположение о связи расслоений экваториального  $F_2$ -слоя с формированием экваториальной аномалии. Васильев [1967] предположил, что с удалением от экватора возрастает роль внутренних гравитационных волн в формировании расслоений экваториального  $F_2$ -слоя. Эта гипотеза используется и в настоящее время для объяснения формирования расслоений на широтах гребней экваториальной аномалии в спокойных геомагнитных условиях [Fagundes et al., 2007].

Исследования расслоений с помощью численных моделей были продолжены в работе [Суроткин и др., 1984]. В этой статье утверждается, что расслоение экваториального  $F_2$ -слоя в около- и послеполуночные часы формируется вследствие неоднородности “фонтан-эффекта” поперек геомагнитного поля: избыток плазмы, поднятый электрическим полем над экватором сбрасывается к гребням экваториальной аномалии, немонотонно изменяющимся поперек геомагнитного поля диффузионным потоком. Эта немонотонность диффузионного потока в свою очередь обусловлена широтными градиентами электронной концентрации в гребнях аномалии и нестационарностью электромагнитного дрейфа и ионообразования, т.е.

расслоение представляет собой двумерное (высота-широта) и нестационарное явление. В работе [Суроткин и др., 1985] была предпринята попытка воспроизвести в модельных расчетах утренние расслоения  $F_2$ -слоя за счет, главным образом, вариаций электрических полей. Показано, что расслоения вообще не формируются без учета зональной компоненты электрического поля, т.е. без учета меридионального  $E \times B$ -дрейфа плазмы. Отмечается, что факторами, способствующими появлению расслоений в утренние часы, могут быть: 1) сдвиг в утренние часы максимума направленного вверх  $E \times B$ -дрейфа, вызываемого действием зонального электрического поля; 2) наличие в дневное время меридионального электрического поля, направленного вверх на экваторе и вызывающего зональный  $E \times B$ -дрейф плазмы из дневного сектора в утренний; 3) отставание по фазе суточной вариации зонального электрического поля на экваторе от вариаций поля на прилегающих широтах. Предполагается, что наиболее существенным процессом для появления расслоений в утренние часы является зональный дрейф плазмы. В работе [Суроткин и др., 1989] показано, что появление расслоений  $F_2$ -слоя имеет место, когда максимум электронной концентрации поднимается вверх в область преобладания диффузионных процессов. В работе [Kolomiitsev et al., 1997] показано, что в вертикальном профиле электронной концентрации на геомагнитном экваторе между максимумом  $F$ -слоя, сформировавшимся ночью, и максимумом  $F$ -слоя, формирующимся утром, возникает область пониженной электронной концентрации. Отмечается, что физическим механизмом, вносящим вклад в сохранение  $F$ -слоя ночью на больших высотах, может быть медленная диффузия на этих высотах. Заметим, что во всех этих работах речь идет о механизмах формирования расслоений  $F_2$ -слоя экваториальной ионосферы, т.е. не только о формировании дополнительного максимума в вертикальном профиле электронной концентрации выше или ниже максимума  $F_2$ -слоя, но и о формировании минимума между двумя максимумами.

Начиная с публикаций [Balan et al., 1997; Jenkins et al., 1997], дополнительный максимум в  $F$ -области экваториальной ионосферы получает новое название —  $F_3$ -слой. С этого момента начинаются интенсивные исследования механизмов формирования  $F_3$ -слоя, без упоминания тех результатов, которые были получены в работах [Суроткин и др., 1984, 1985, 1989; Kolomiitsev et al., 1997] для расслоений экваториального  $F_2$ -слоя, хотя абсолютно очевидно, что расслоение экваториального  $F_2$ -слоя и формирование  $F_3$ -слоя в экваториальной ионосфере — это одно и то же явление. Это можно объяснить только тем, что все эти работы, кроме последней, вышедшей как раз в 1997 г., были изданы в отечественных изданиях и

по этой причине были мало известны за рубежом. Однако следует отметить, что результаты исследований, приведенные в статьях [Balan et al., 1997, 1998; Jenkins et al., 1997; Abdu, 1999; Batista et al., 2002], прояснили в деталях морфологию появления дополнительного слоя на геомагнитном экваторе выше максимума  $F2$ -слоя. В ходе этих исследований был сформулирован более корректно механизм формирования этого слоя в утренние часы. В работе [Balan et al., 1997] отмечается, что выступ возникает при движении гребня экваториальной аномалии к полюсу от утренних часов к полудню. В работе [Jenkins et al., 1997] продемонстрирована роль трансэкваториальных ветров как необходимого условия для формирования  $F3$ -слоя в летних и зимних условиях в минимуме солнечной активности. Отмечается, что наблюдаемая стратификация  $F$ -области не может являться следствием перемещающихся ионосферных возмущений, вызванных гравитационными волнами по следующим причинам: 1) критическая частота  $F3$ -слоя, который всегда формируется выше основного максимума  $F2$ -слоя и не перемещается вниз, как это ожидается при наличии внутренних гравитационных волн (движение вниз фазовых характеристик), всегда больше  $foF2$ ; 2) явление существует в течение нескольких часов до местного полудня, когда зональная компонента электрического поля на экваторе максимальная; 3) отсутствие периодичности в наблюдаемых максимумах, которая должна присутствовать при волновом распространении.

Исследователи, наблюдавшие дополнительный слой над максимумом  $F2$ -слоя, отмечали, что для физического объяснения формирования этой особенности экваториальной ионосферы необходимо проведение исследований на численной модели с учетом электромагнитного дрейфа и эффектов трансэкваториальных термосферных ветров. Такие результаты, которые были приведены в работе [Balan et al., 1998], показали, что  $F3$ -слой возникает благодаря фотохимическим и динамическим процессам в  $F$ -области. Механизм формирования  $F3$ -слоя, предложенный в работе [Balan et al., 1998], выглядит следующим образом. Рано утром существует регулярный  $F2$ -слой. Со временем этот слой становится шире за счет эффекта фотоионизации и специфических динамических эффектов в экваториальной области. Максимум формирующегося слоя поднимается быстрее, чем на других широтах, за счет доминирования эффекта  $\mathbf{E} \times \mathbf{V}$ -дрейфа. Поднимаясь, этот максимум проходит через область, в которой химические и динамические процессы одинаково важны, и попадает в область доминирования динамических процессов. В это время ниже этого максимума в области равновесия химических и динамических процессов появляется второй максимум. Верхний максимум и есть макси-

мум  $F3$ -слоя, который через некоторое время исчезает за счет химических потерь и диффузии, доминирующих над процессами ионизации на этих высотах. В статье делается вывод о том, что  $F3$ -слой формируется в утренне-дневном секторе, когда источник ионизации доминирует над потерями благодаря подъему плазмы под действием  $\mathbf{E} \times \mathbf{V}$ -дрейфа и нейтрального ветра.

Если с этим выводом авторов можно отчасти согласиться, то о причинах исчезновения  $F3$ -слоя за счет химических потерь и диффузии можно поспорить. Не вызывает сомнений роль диффузии в уменьшении плотности плазмы в максимуме  $F3$ -слоя при его подъеме на большие высоты. Это происходит за счет диффузионного перераспределения плазмы из вершины плазменной трубки вниз вдоль силовых линий геомагнитного поля. Что же касается потерь, то их привлечение для объяснения падения плотности плазмы в максимуме  $F3$ -слоя при его движении вверх в область меньших скоростей потерь выглядит неоправданным. Не следует забывать при этом, что в  $F$ -области ионосферы скорости химических потерь с высотой падают гораздо быстрее, чем скорость ионообразования. Отсюда следует вывод, что падение плотности плазмы в максимуме  $F3$ -слоя при его движении вверх под действием восточного электрического поля происходит только из-за диффузии, а потери и ионообразование при этом играют второстепенную роль.

### 3. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ ГСМ ТИП

В целом ряде существующих моделей ионосферы такие характеристики околоземной среды, как проводимость, электрическое поле, состав, тепловой режим и динамика нейтральной атмосферы являются входными параметрами, т.е. задаются на основе эмпирических моделей. В отличие от этих моделей в Глобальной Самосогласованной Модели Термосферы, Ионосферы и Протоносферы (ГСМ ТИП), детально описанной в работах [Namgaladze et al., 1988; Намгаладзе и др., 1990], все вышеперечисленные параметры рассчитываются самосогласованным образом. Модель ГСМ ТИП была разработана в лаборатории моделирования ионосферных процессов Западного отделения ИЗМИРАН.

Модель рассчитывает зависящие от времени глобальные трехмерные распределения температуры, состава ( $O_2$ ,  $N_2$ ,  $O$ ) и вектора скорости движения нейтрального газа, концентрации, температуры и векторных скоростей атомарных ( $O^+$ ,  $H^+$ ) ионов, электронов и суммы молекулярных ионов, а также двумерного распределения потенциала электрического поля динамо и магнитосферного происхождения. Модель основана на

численном интегрировании системы квазигидродинамических уравнений непрерывности, движения и теплового баланса для нейтральных и заряженных частиц холодной околоземной плазмы совместно с уравнением для потенциала электрического поля. Геомагнитное поле Земли аппроксимируется наклоненным диполем. При этом учитывается несовпадение географической и геомагнитной осей Земли. Уравнения для нейтральных частиц и молекулярных ионов интегрируются в интервале высот 80–520 км в сферической геомагнитной системе координат. Уравнения для атомарных ионов и электронов интегрируются вдоль силовых линий геомагнитного поля в дипольной системе координат с учетом электромагнитного дрейфа от 175 км над поверхностью Земли до геоцентрического расстояния 14.9 земных радиусов. В модели используется пространственная сетка с шагами  $5^\circ$  по широте и  $15^\circ$  по долготе, в которой рассчитываются параметры нейтральной атмосферы и двумерное распределение электрического потенциала, а также заданы основания силовых линий геомагнитного поля на высоте 175 км. При интегрировании моделирующих уравнений используется переменный шаг по вертикали, растущий с высотой. Все уравнения модели решаются методом конечных разностей. Начальные условия для решения системы моделирующих уравнений выбирались произвольным образом, и расчеты проводились с шагом 2 мин до получения квазипериодических решений. В качестве нижних граничных условий использовались условия фотохимического и теплового равновесия.

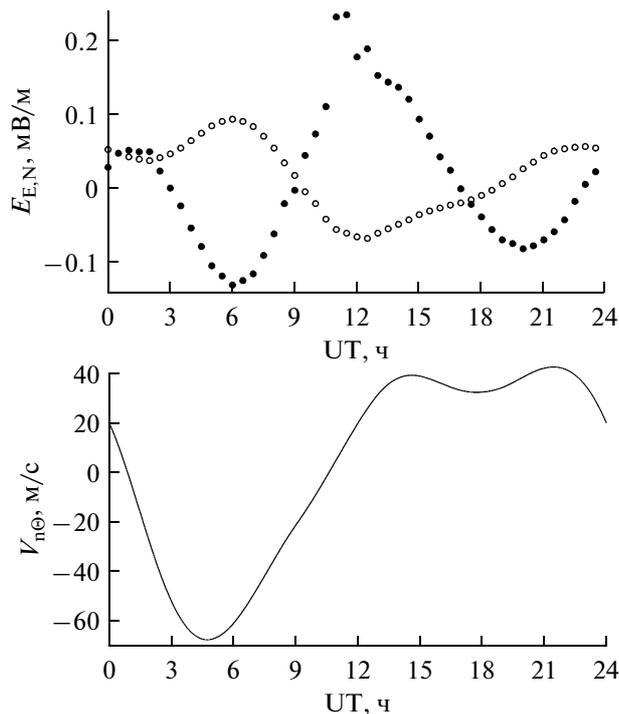
В работе [Клименко и др., 2006] была представлена новая модель электрического поля и зонального тока в ионосфере Земли, которая заменила старый блок расчета электрических полей в модели ГСМ ТИП. Эта модернизация позволила корректно описывать электрические поля и токи в ионосфере низких и экваториальных широт и, в частности, вечерний всплеск восточного электрического поля и экваториальный электроджет. В модифицированной модели ГСМ ТИП корректно учитываются все те процессы, которые привлекаются исследователями для объяснения расслоения  $F_2$ -слоя экваториальной ионосферы и формирования  $F_3$ -слоя, а именно: электромагнитные дрейфы под действием зонального и меридионального электрического поля, нейтральные ветры, процессы диффузии тепловой плазмы вдоль силовых линий геомагнитного поля, фотоионизация и химические потери. Результаты численных расчетов, представленные в работе [Клименко и Клименко, 2011], показали, что в спокойных геомагнитных условиях модель воспроизводит расслоение  $F_2$ -слоя и появление  $F_3$ -слоя на геомагнитном экваторе в вертикальном профиле электронной концентрации только

при использовании модели MSIS-90 [Hedin, 1991] для расчета параметров нейтральной атмосферы. Поскольку модель MSIS-90 основана на экспериментальных данных, то она содержит вариации термосферных параметров, вызванные, в том числе, термосферными приливами, которые при самосогласованных расчетах параметров нейтральной атмосферы нами пока не учитывались. Известно, что динамо электрическое поле формируется в токопроводящем слое ионосферы термосферными ветрами, которые в этой области высот сильно зависят от термосферных приливов. Неучет приливов приводит к меньшей амплитуде электрического поля. Был сделан вывод, что для описания возникновения расслоения  $F_2$ -слоя и формирования  $F_3$ -слоя в модельных расчетах необходимо учитывать термосферные приливы.

Кроме того, в работе [Клименко и Клименко, 2011] на основании модельных расчетов предсказано формирование ионами  $H^+$  максимума в вертикальном профиле электронной концентрации на высоте  $\sim 1000$  км в экваториальной ионосфере в ночное время. Так как этот слой находится выше  $F$ -слоя и напрямую с ним никак не связан, в соответствии со сложившейся классификацией слоев в земной ионосфере, он был нами назван  $G$ -слоем. Главное его отличие от  $F_3$ -слоя заключается в том, что  $F_3$ -слой формируется ионами  $O^+$ , а  $G$ -слой – ионами  $H^+$ . Следует отметить, что в расчетах не учитывались ионы  $He^+$ , которые в отдельные моменты времени могут влиять на высотный профиль электронной концентрации на высотах  $\sim 1000$  км. Однако, поскольку ионы  $H^+$  являются основными во внешней ионосфере, то мы полагаем, что учет ионов  $He^+$  в модельных расчетах не приведет к исчезновению  $G$ -слоя. Таким образом, можно надеяться обнаружить  $G$ -слой в экваториальной ионосфере при зондировании ионосферы сверху с космических аппаратов, которые должны летать на высотах выше 1000 км. Главная трудность в обнаружении этого слоя заключается в том, что его плотность невелика, существует он непродолжительное время и формируется на достаточно большой высоте, которая выше траекторий пролетов большинства существовавших и существующих спутников. Механизм формирования  $G$ -слоя может быть связан со всеми теми процессами, о которых говорилось выше при объяснении формирования  $F_3$ -слоя.

#### 4. ОПИСАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТОВ И ОБСУЖДЕНИЕ

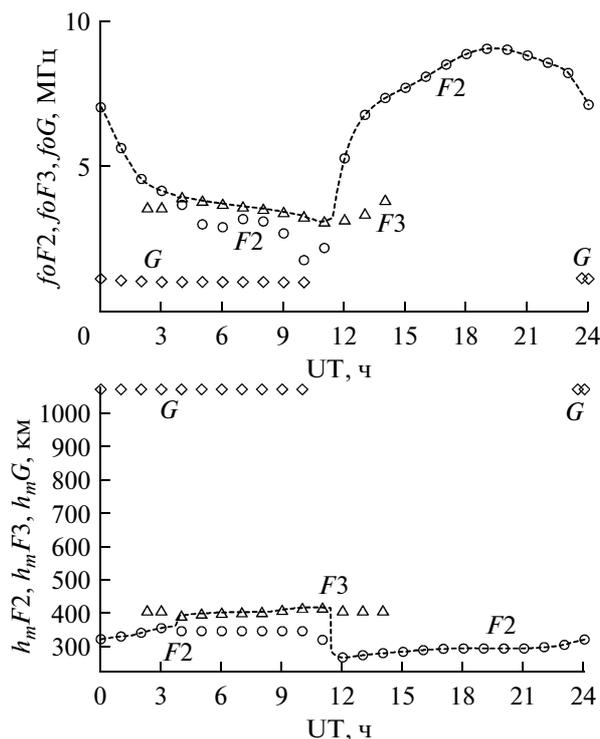
В данной работе в рамках модифицированной модели ГСМ ТИП мы провели исследования механизмов формирования дополнительных слоев в



**Рис. 1.** Суточные вариации зональной,  $E_E$ , положительной на восток (темные кружки), и меридиональной,  $E_N$ , положительной на север (светлые кружки), компонент электрического поля в мВ/м (вверху) и меридиональной компоненты скорости термосферного ветра,  $V_{\theta}$ , в м/с (внизу) в сферической геомагнитной системе координат на высоте 300 км, рассчитанные в модели ГСМ ТИП для ст. Jicamarca.

экваториальной ионосфере. В расчетах учитывалось только динамо электрическое поле, генерируемое термосферным ветром, и не учитывалось поле магнитосферной конвекции. Расчеты проводились для спокойных равноденственных условий 22 марта 1987 г. в минимуме солнечной активности ( $F10.7 = 76$ ). При этом значения таких термосферных параметров, как концентрации молекулярного кислорода, молекулярного азота и атомарного кислорода, а также температура нейтрального газа, рассчитывались в области высот 80–520 км с использованием модели MSIS-90 [Hedin, 1991].

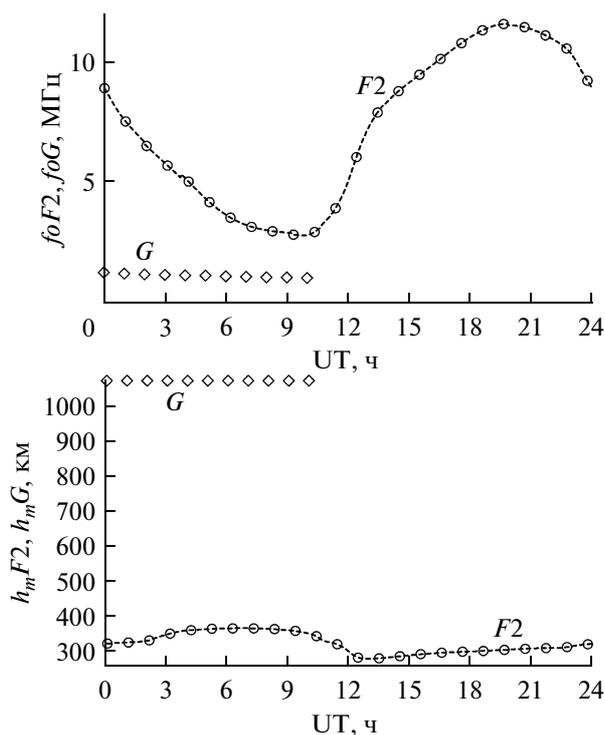
На рисунке 1 показаны суточные вариации зональной и меридиональной компонент электрического поля, а также меридиональной компоненты скорости термосферного ветра на высоте 300 км, рассчитанные в модели ГСМ ТИП над ст. Jicamarca ( $11.9^{\circ}\text{S}$ ,  $76.0^{\circ}\text{W}$ ;  $-0.6^{\circ}$ ,  $353.9^{\circ}$ ) с использованием модели MSIS-90. Показанные здесь параметры, вместе с составом нейтральной атмосферы, ответственны за поведение электронной концентрации в  $F$ -области низкоширотной ионосферы. Видно, что максимальная амплитуда восточного электрического поля превышает некоторое пороговое значение  $\sim 0.2$  мВ/м, которое,



**Рис. 2.** Суточные вариации критических частот  $F2$ -,  $F3$ - и  $G$ -слоев,  $foF2$ ,  $foF3$  и  $foG$ , в МГц (вверху) и высот максимумов этих слоев,  $hmF2$ ,  $hmF3$  и  $hmG$ , в км (внизу) для ст. Jicamarca, полученные в модели ГСМ ТИП в полном варианте расчетов (с учетом электромагнитного дрейфа и термосферного ветра, показанных на рис. 1). Параметры максимума  $F2$ -слоя показаны кружками,  $F3$ -слоя – треугольниками,  $G$ -слоя – ромбиками. Поведение регулярного максимума показано штриховыми линиями.

как показано в работе [Клименко и Клименко, 2011], необходимо для возникновения расслоения  $F2$ -слоя экваториальной ионосферы и, соответственно, для формирования дополнительного  $F3$ -слоя.

На рисунке 2 показаны суточные вариации критических частот  $F2$ -слоя,  $foF2$ ,  $F3$ -слоя,  $foF3$ , регулярного максимума  $F$ -области ионосферы,  $foF$ , и  $G$ -слоя,  $foG$ , а также высот максимумов этих слоев над ст. Jicamarca, рассчитанные в модели ГСМ ТИП с учетом электромагнитного дрейфа и термосферного ветра, показанных на рис. 1. Видно, что около 04:00 UT имеется скачок высоты максимума  $F$ -области ионосферы на  $\sim 60$  км вверх и резкое падение около 11:00 UT на  $\sim 150$  км вниз. Эти резкие изменения высоты максимума  $F$ -области связаны с тем, что в период с  $\sim 04:00$  UT до  $\sim 11:00$  UT  $foF3 > foF2$ . При этом видно, что слой  $F3$  появляется несколько раньше  $\sim$  в 02:00 UT, а исчезает несколько позже  $\sim$  в 14:00 UT. Однако, в периоды 02:00–04:00 UT и 11:00–14:00 UT  $foF3 < foF2$ . Кроме того, видно, что в период с 00:00 до

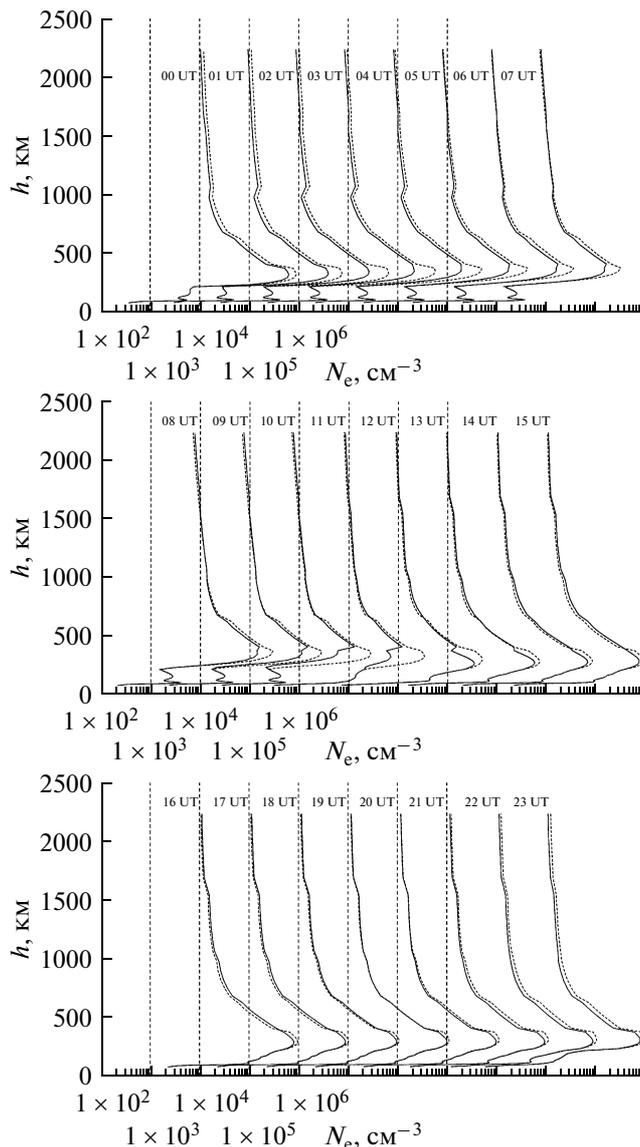


**Рис. 3.** Суточные вариации  $foF2$  и  $foG$  в МГц (вверху) и  $h_mF2$  и  $h_mG$  в км (внизу) для ст. Исатагса, полученные в модельных расчетах без учета меридиональной компоненты электромагнитного дрейфа. Параметры максимума F2-слоя показаны кружками, G-слоя – ромбиками. Поведение регулярного максимума показано штриховыми линиями.

10:00 UT на высоте ~1080 км формируется G-слой.

**4.1. Влияние различных механизмов на формирование дополнительных слоев в экваториальной ионосфере**

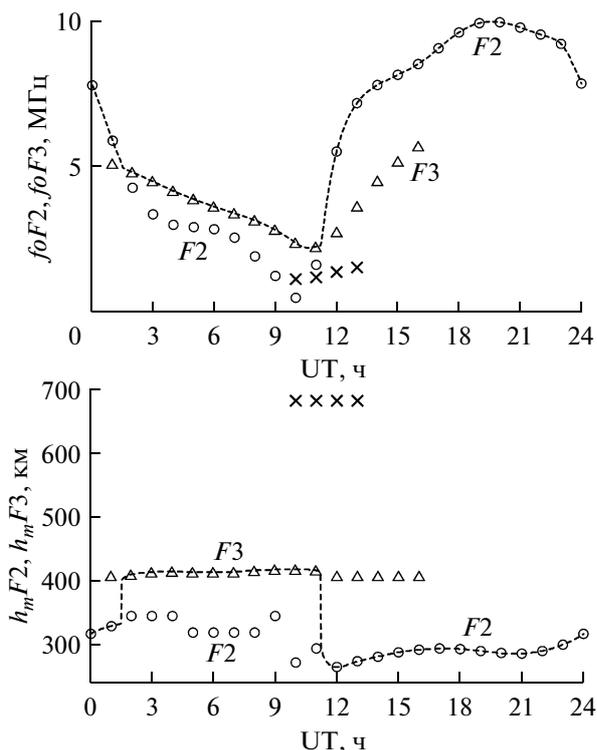
Для того, чтобы выяснить влияние меридиональной компоненты электромагнитного дрейфа на формирование F3- и G-слоев, нами были проведены расчеты, в которых не учитывалась зональная компонента электрического поля. На рисунке 3 показаны результаты этих расчетов в виде суточных вариаций параметров максимумов F2- и G-слоев. Из рисунка видно, что отсутствие меридиональной компоненты электромагнитного дрейфа приводит к тому, что F3-слой либо не формируется вообще, либо, если все-таки формируется, то  $foF3 < foF2$ : скачки в суточном ходе высоты абсолютного максимума F-области отсутствуют, а ход его критической частоты и высоты полностью совпадают с ходом  $foF2$  и  $h_mF2$ . При этом поведение параметров G-слоя практически не меняется. Это указывает на то, что F3-слой, скорее всего, формируется только при наличии зональной компоненты электрического поля, ко-



**Рис. 4.** Вертикальные профили электронной концентрации в  $cm^{-3}$ , рассчитанные в модели ГСМ ТИП для ст. Исатагса для различных моментов времени. Сплошными кривыми показаны результаты полных расчетов, а штриховыми – результаты расчетов без учета меридиональной компоненты электромагнитного дрейфа. Начала отсчетов по оси абсцисс для каждого последующего момента времени отмечены вертикальными штриховыми линиями.

торая в свою очередь не имеет отношения к формированию G-слоя.

Это предположение подтверждается результатами расчетов, представленными на рисунке 4. На этом рисунке показаны вертикальные профили электронной концентрации над ст. Исатагса для различных моментов времени, полученные в полном варианте расчетов с учетом электромагнитного дрейфа и термосферного ветра, и в варианте расчетов с учетом термосферного ветра, но



**Рис. 5.** Суточные вариации  $foF2$  и  $foF3$  в МГц (вверху) и  $h_mF2$  и  $h_mF3$  в км (внизу) для ст. Лисатага, полученные в модельных расчетах без учета меридиональной компоненты термосферного ветра в уравнениях движения тепловой плазмы на высотах  $F$ -области ионосферы и выше. Параметры максимума  $F2$ -слоя показаны кружками,  $F3$ -слоя — треугольниками. Крестиками показаны параметры промежуточного слоя, формирующегося в отсутствие термосферного ветра. Поведение абсолютного максимума показано штриховыми линиями.

без меридиональной компоненты электромагнитного дрейфа. Следует отметить формирование в полном варианте расчетов расслоения  $F2$ -слоя (с 09 до 13 UT) и  $F3$ -слоя (с 02 до 14 UT) над Лисатага. Отсутствие меридиональной компоненты электромагнитного дрейфа приводит к росту электронной концентрации в верхней части вертикального профиля  $N_e(h)$  практически на всех высотах и в любое время за исключением утренних и околополуденных часов местного времени (LT в Лисатага = UT - 5), а также к исчезновению расслоения экваториального  $F2$ -слоя и, как следствие, к отсутствию  $F3$ -слоя. Что касается  $G$ -слоя, то, как уже отмечалось выше, на его формирование отсутствие зональной компоненты электрического поля не сказывается.

Результаты расчетов без меридиональной компоненты электрического поля показали, что ее учет влияет только на время появления и существования  $F3$ -слоя и расслоения  $F2$ -слоя в экваториальной ионосфере. Этот вывод согласуется с результатами, полученными в работе [Суроткин

и др., 1985], где предполагалось, что именно зональный электромагнитный дрейф плазмы ответствен за смещение расслоения экваториального  $F2$ -слоя в утренний сектор местного времени. Следует отметить, что эффекты меридиональной компоненты электрического поля проявляются только в том случае, если имеется долготный градиент электронной концентрации. Результаты наших расчетов показали, что меридиональная компонента электрического поля не оказывает влияния на формирование  $G$ -слоя. Результаты расчетов без меридиональной компоненты электрического поля мы не приводим из-за того, что, как сказано выше, зональный  $\mathbf{E} \times \mathbf{V}$ -дрейф плазмы не является механизмом формирования  $F3$ - и  $G$ -слоев и расслоения  $F2$ -слоя.

Для того, чтобы выяснить роль меридиональной компоненты скорости термосферного ветра в формировании  $F3$ - и  $G$ -слоев, мы провели расчеты в отсутствие эффектов переноса тепловой плазмы в  $F$ -области экваториальной ионосферы за счет меридиональной компоненты скорости термосферного ветра, результаты которых представлены на рис. 5 и 6. На рисунке 5 показаны суточные вариации параметров максимумов слоев  $F2$ ,  $F3$  и  $G$ , полученные в модельных расчетах без учета меридиональной компоненты скорости термосферного ветра в уравнениях движения тепловой плазмы на высотах  $F$ -области ионосферы и выше. Видно, что в этом случае  $G$ -слой отсутствует. Это говорит о том, что механизм формирования этого слоя связан с действием меридиональной компоненты термосферного ветра. Следует заметить, что отсутствие меридиональной компоненты термосферного ветра привело к тому, что слой  $F3$  стал формироваться в 01:00 UT, т.е. раньше, чем в полном варианте расчетов (02:00 UT), а исчезать в 16:00 UT, т.е. позже, чем в полном варианте расчетов (в 14:00 UT). Это согласуется с результатами, полученными в работе [Balan et al., 1998], где показано, что меридиональный ветер влияет на время появления и исчезновения  $F3$ -слоя. Период формирования абсолютного максимума за счет  $F3$ -слоя также изменился: если в полном варианте расчетов он был 03:00–12:00 UT, то при отсутствии меридиональной компоненты термосферного ветра он стал 01:30–11:00 UT. При этом следует отметить появление в результатах расчетов без меридиональной компоненты термосферного ветра дополнительного промежуточного слоя на высотах  $\sim 700$  км в период с 10:00 до 13:00 UT, которого не было в полном варианте расчетов и в варианте расчетов без зональной компоненты электрического поля. По-видимому, не следует придавать большого значения этому слою, поскольку он формируется в модельных условиях в отсутствие меридиональной компоненты термосферного ветра. Однако, при малых значениях меридиональной компоненты скоро-

сти термосферного ветра возможно появление еще одного дополнительного слоя в экваториальной ионосфере на высотах ~700 км.

Чтобы более детально рассмотреть эффекты меридиональной компоненты скорости термосферного ветра, на рисунке 6 показаны результаты модельных расчетов вертикальных профилей электронной концентрации над ст. Jicamarca для различных моментов времени, полученные в полном варианте расчетов и в расчетах без учета меридиональной компоненты скорости термосферного ветра в уравнениях движения тепловой плазмы на высотах F-области ионосферы и выше. Из рисунка видно, что учет меридионального термосферного ветра приводит к понижению  $foF3$  в интервале от 05:00 до 11:30 UT (00:00–06:30 LT) и уменьшению  $foF2$  с 12:00 до 01:30 UT (07:00–20:30 LT). В те же моменты времени, когда  $foF3 > foF2$ , учет меридиональной компоненты термосферного ветра приводит к росту как  $foF3$ , так и  $foF2$ , причем F3-слой, формирующийся без меридионального ветра, этим ветром с 02:00 до 05:00 UT (21:00–24:00 LT) разрушается, а в остальное время ослабляется. Это говорит о том, что термосферный ветер препятствует развитию процесса расслоения F2-слоя экваториальной ионосферы и формирования F3-слоя. Что касается G-слоя, формирующегося на высотах ~1000 км с 00:00 до 05:00 UT в полном варианте расчетов, то, как видно из рисунка 6, в отсутствие меридиональной компоненты термосферного ветра он не формируется.

#### 4.2. Обсуждение механизмов формирования F3- и G-слоев

В предыдущем разделе на основании модельных расчетов показано, что G-слой в экваториальной ионосфере формируется меридиональной компонентой скорости термосферного ветра, а F3-слой – меридиональной компонентой скорости  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ -дрейфа плазмы под действием зональной компоненты электрического поля. Все представленные ниже рассуждения и выводы получены на основе анализа результатов полного варианта модельных расчетов с учетом электрического поля и термосферного ветра.

Рассмотрим более подробно механизм формирования G-слоя. На рисунке 7 показаны вертикальные профили электронной концентрации и концентрации атомарных ионов  $O^+$  и  $H^+$ , рассчитанные в модели GSM ТИП над ст. Jicamarca для 03:00 UT, когда существует G-слой. Здесь же показаны широтный профиль электронной концентрации на высоте 300 км и широтно-высотные распределения электронной концентрации и меридиональной компоненты скорости термосферного ветра, рассчитанные в окрестности геомагнитной долготы ст. Jicamarca для того же момента времени.

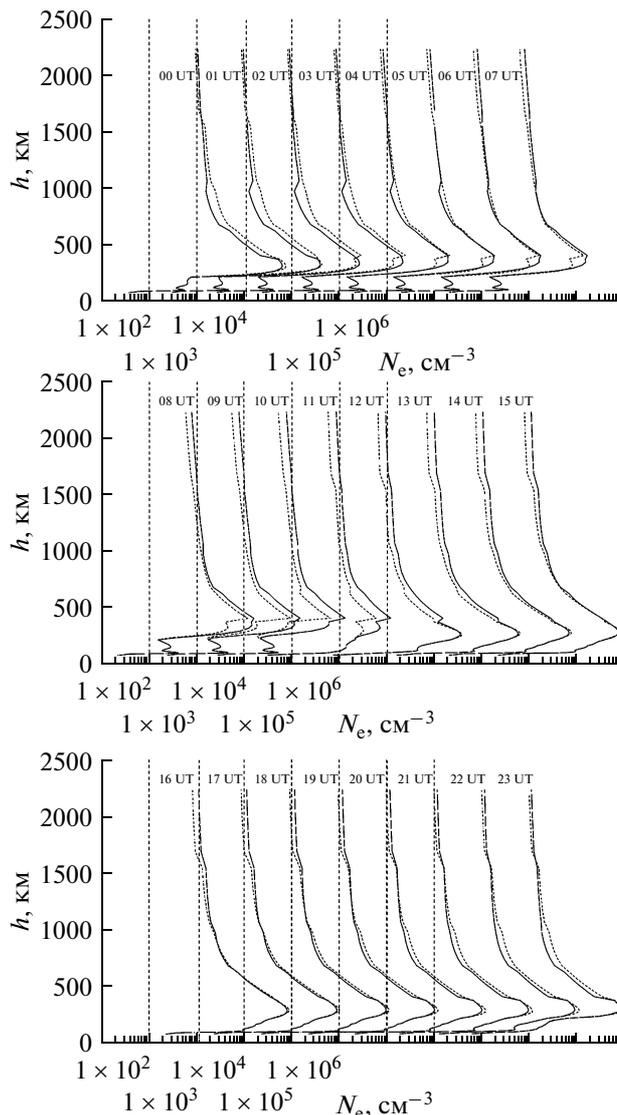
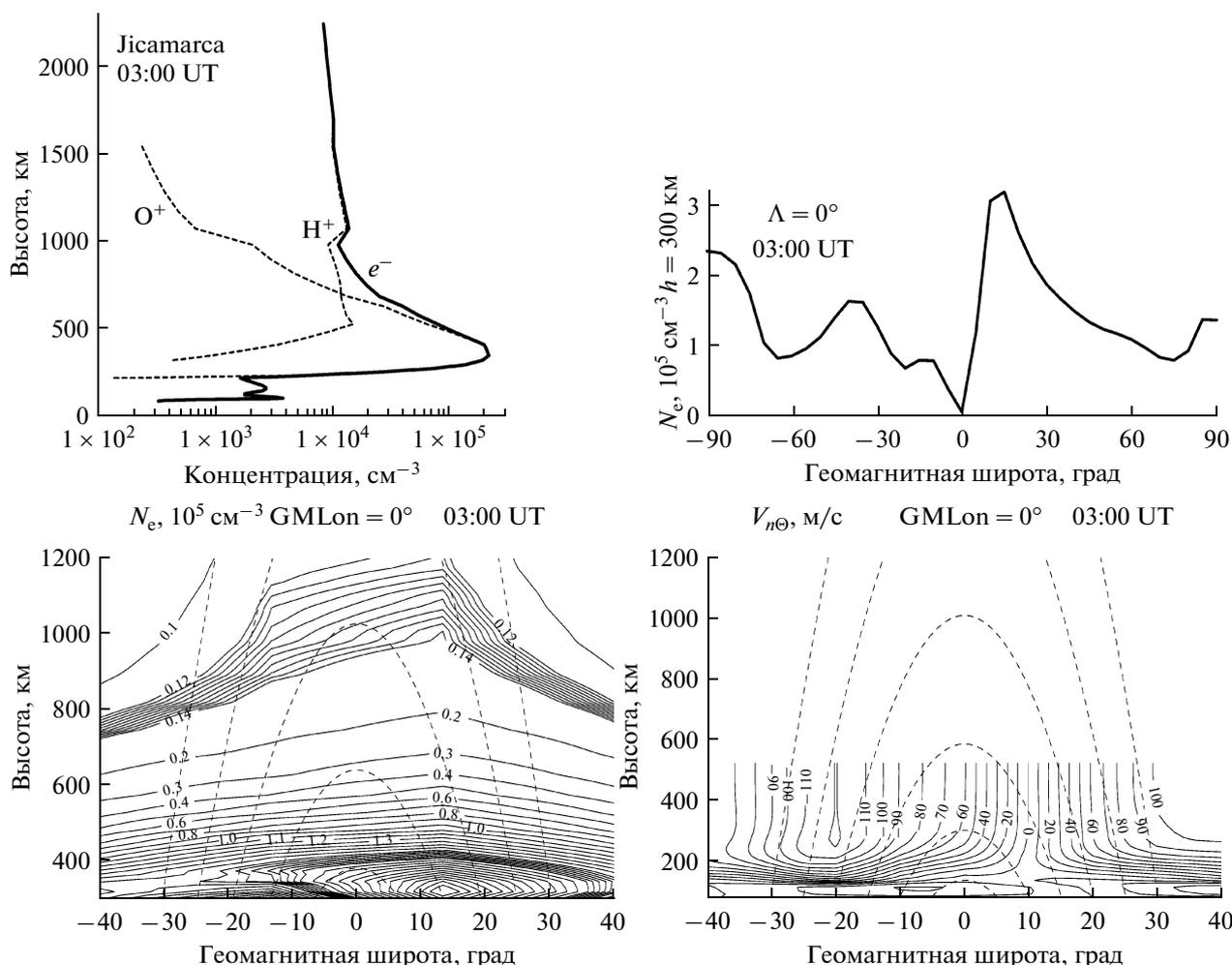


Рис. 6. То же, что и на рис. 4, но для полных расчетов (сплошные кривые) и для расчетов без учета меридиональной компоненты термосферного ветра в уравнениях движения тепловой плазмы на высотах F-области ионосферы и выше (штриховыми кривые).

Из вертикальных профилей отчетливо видно, что G-слой формируется ионами  $H^+$ . Приведенный на этом рисунке широтный профиль электронной концентрации соответствует предполночным условиям, поскольку 03:00 UT в Jicamarca соответствует 22:00 LT. Максимумы в широтном ходе электронной концентрации, формирующиеся на геомагнитных широтах  $\pm 15^\circ$ , полученные в наших расчетах, есть не что иное, как гребни ночной экваториальной аномалии. Минимумы электронной концентрации, формирующиеся в субавроральных широтах обоих полушарий, связаны с главным ионосферным провалом. Максимум в широтном ходе электронной концентрации на геомагнитной широте  $-40^\circ$  является хорошо из-



**Рис. 7.** Вверху — вертикальные профили электронной концентрации (сплошная линия) и концентрации атомарных ионов  $O^+$  и  $H^+$  (штриховые линии) в  $см^{-3}$ , рассчитанные в модели ГСМ ТИП для ст. Jicamarca для 03:00 UT (слева) и широтный профиль электронной концентрации на высоте 300 км, рассчитанный в окрестности геомагнитной долготы ст. Jicamarca для того же момента времени (справа). Внизу — широтно-высотные распределения электронной концентрации в  $см^{-3}$  (слева) и меридиональной компоненты скорости термосферного ветра в м/с (справа), рассчитанные для того же момента времени на геомагнитной долготе Jicamarca. Штриховыми линиями показаны силовые линии дипольного геомагнитного поля.

вестным ночным среднеширотным возрастанием, которое связывают с действием термосферного ветра [Mikhailov et al., 2000; Farello et al., 2002; Князева и Намгаладзе, 2005]. Видно, что электронная концентрация начинает возрастать на широте  $-20^\circ$  и достигает максимума на  $-40^\circ$ . При построении широтно-высотного распределения электронной концентрации, для того чтобы увидеть небольшой максимум, мы ввели дополнительные изолинии, показанные штриховыми линиями и пересекающие геомагнитный экватор вблизи высоты  $\sim 1000$  км. “Сгущение” изолиний вблизи экватора на этой высоте как раз и говорит о формировании здесь максимума в высотном профиле электронной концентрации. Силовая линия геомагнитного поля с вершиной на высоте  $\sim 1000$  км протягивается в  $F$ -область ионосферы

южного полушария в точку на высоте  $\sim 300$  км с геомагнитной широтой  $-20^\circ$ , т.е. в то место, где в широтном ходе электронной концентрации начинается рост, связанный с ночным среднеширотным максимумом. Из этого мы делаем вывод о связи  $G$ -слоя с ночным среднеширотным максимумом, наблюдающимся в эксперименте в спокойных геомагнитных условиях. Отличие между ними заключается в том, что среднеширотный ночной максимум формируется ионами  $O^+$  на высотах  $F$ -области среднеширотной ионосферы, а  $G$ -слой — ионами  $H^+$  на высотах внешней экваториальной ионосферы. Связь между ними осуществляется посредством диффузионных потоков плазмы вдоль силовых линий геомагнитного поля.

Широтно-высотное распределение меридиональной компоненты скорости термосферного ветра не только подтверждает механизм формирования  $G$ -слоя и ночного среднеширотного максимума меридиональной компонентой термосферного ветра, но и объясняет, каким образом возникают эти неоднородности, связанные друг с другом. Из рисунка видно, что в обоих полушариях на высотах  $F$ -области ионосферы (вблизи высоты  $\sim 300$  км) меридиональная компонента скорости термосферного ветра направлена к экватору всюду за исключением интервала геомагнитных широт от  $-15^\circ$  до  $+15^\circ$ . За счет ион-нейтральных столкновений меридиональная компонента термосферного ветра, направленная к экватору в обоих полушариях, переносит плазму вдоль силовых линий геомагнитного поля к их вершинам, приводя к накоплению плазмы на геомагнитном экваторе в вершинах этих силовых линий. Необходимо отметить, что меридиональная компонента термосферного ветра в южном полушарии на геомагнитной широте  $-20^\circ$  имеет максимум в широтном ходе. Из-за этого перенос плазмы вдоль силовых линий геомагнитного поля к их вершинам становится неоднородным по широте. Наибольшие эффекты будут проявляться в вершине плазменной трубки с основаниями, расположенными на высоте  $\sim 300$  км на геомагнитных широтах  $\pm 20^\circ$ . В то же время, неоднородный по широте перенос плазмы на высотах  $F$ -области ионосферы под действием меридиональной компоненты термосферного ветра в диапазоне геомагнитных широт от  $-20^\circ$  до  $-40^\circ$  в ночное время приводит к формированию на этих широтах ночных среднеширотных максимумов, наблюдающихся в эксперименте.

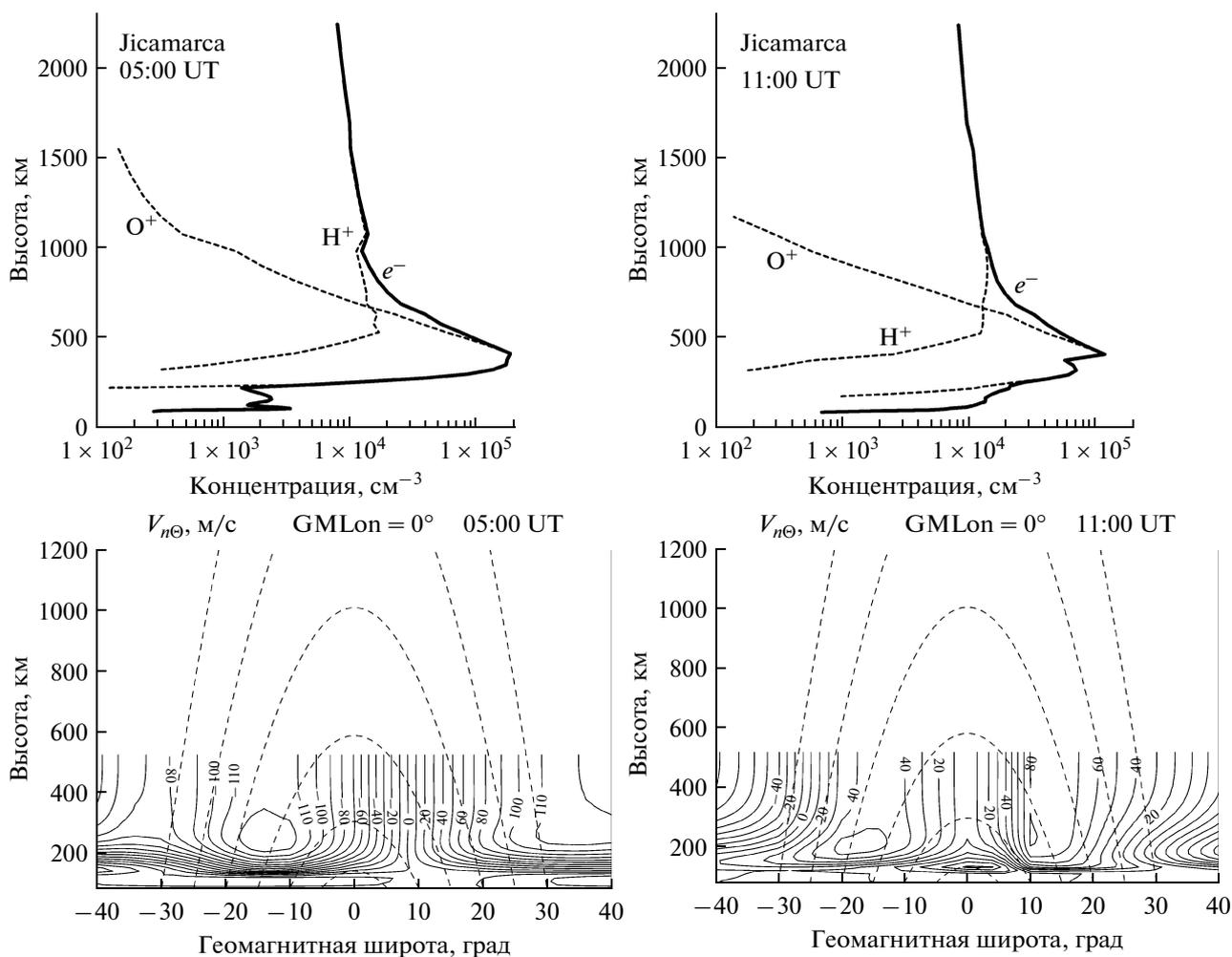
Далее мы обратили внимание на то, каким образом изменения термосферного ветра влияют на формирование  $G$ -слоя. Для этого был построен рис. 8, на котором показаны вертикальные профили концентрации электронов и атомарных ионов  $O^+$  и  $H^+$ , рассчитанные в модели ГСМ ТИП над ст. Jicamarca для 05:00 и 11:00 UT, т.е. в период существования и исчезновения  $G$ -слоя. Кроме того, здесь же показаны широтно-высотные распределения меридиональной компоненты скорости термосферного ветра, рассчитанные для этих же моментов времени на геомагнитной долготе, близкой к долготе ст. Jicamarca. Вертикальные профили для 05:00 UT еще раз подтверждают, что  $G$ -слой формируется ионами  $H^+$ . Обратившись к широтно-высотным распределениям меридиональной компоненты скорости термосферного ветра, можно заметить, что распределение для 05:00 UT очень похоже на рассмотренное выше распределение для 03:00 UT, что объясняет наличие в этот момент времени  $G$ -слоя. Что же касается аналогичного распределения для 11:00 UT, то можно заметить, что оно сильно отличается от

распределений для 03:00 и 05:00 UT. Если в 03:00 и в 05:00 UT скорость термосферного ветра в обоих полушариях была направлена к экватору, что приводило к “сгонке” плазмы к вершинам силовых линий, то в 11:00 UT скорость ветра в южном полушарии направлена к южному полюсу, а в северном — к экватору. Это приводит к перекачке тепловой плазмы из северного полушария в южное и к исчезновению условий формирования  $G$ -слоя, что и подтверждается его отсутствием в вертикальном профиле электронной концентрации в 11:00 UT.

Перейдем теперь к формированию  $F_3$ -слоя в экваториальной ионосфере под действием зональной компоненты электрического поля и попробуем разобраться, каким образом это происходит. Снова обратимся к рис. 8, из которого видно, что  $F_3$ -слой формируется ионами  $O^+$ . В 05:00 UT существует  $F_3$ -слой и расслоение  $F_2$ -слоя. Момент времени 11:00 UT соответствует времени наиболее яркого проявления этого события.

Для того чтобы понять, каким образом возникает расслоение экваториального  $F_2$ -слоя и происходит формирование  $F_3$ -слоя, обратимся к рис. 9, на котором показаны широтные распределения зонального электрического поля вблизи геомагнитной долготы ст. Jicamarca, рассчитанные для моментов времени, когда  $F_3$ -слой существует, и когда он отсутствует. Поскольку силовые линии геомагнитного поля эквипотенциальны из-за их высокой продольной проводимости на высотах  $F$ -области ионосферы и выше, широтное распределение электрического поля передается по силовым линиям геомагнитного поля к их вершинам. Таким образом, происходит формирование вертикального распределения электрического поля на геомагнитном экваторе, также показанного на рис. 9.

Видно, что в 03:00 и в 06:00 UT электрическое поле вблизи экватора направлено на запад и усиливается в этот период времени. При удалении от экватора электрическое поле становится восточным. Это приводит к тому, что на ионосферную плазму на геомагнитном экваторе в нижней части  $F$ -области действует западное электрическое поле, которое растет с высотой, достигает своего максимума, а затем падает, переходя в восточное. Неоднородный по высоте электромагнитный дрейф плазмы на геомагнитном экваторе под действием такого электрического поля приводит к опусканию нижней части профиля и к отрицательным эффектам в электронной концентрации в этой области высот, а также к подъему верхней части профиля и к положительным эффектам на этих высотах. Если в 03:00 UT максимальный эффект дрейфа вниз под действием западного электрического поля приходится на высоту  $\sim 600$  км, то со

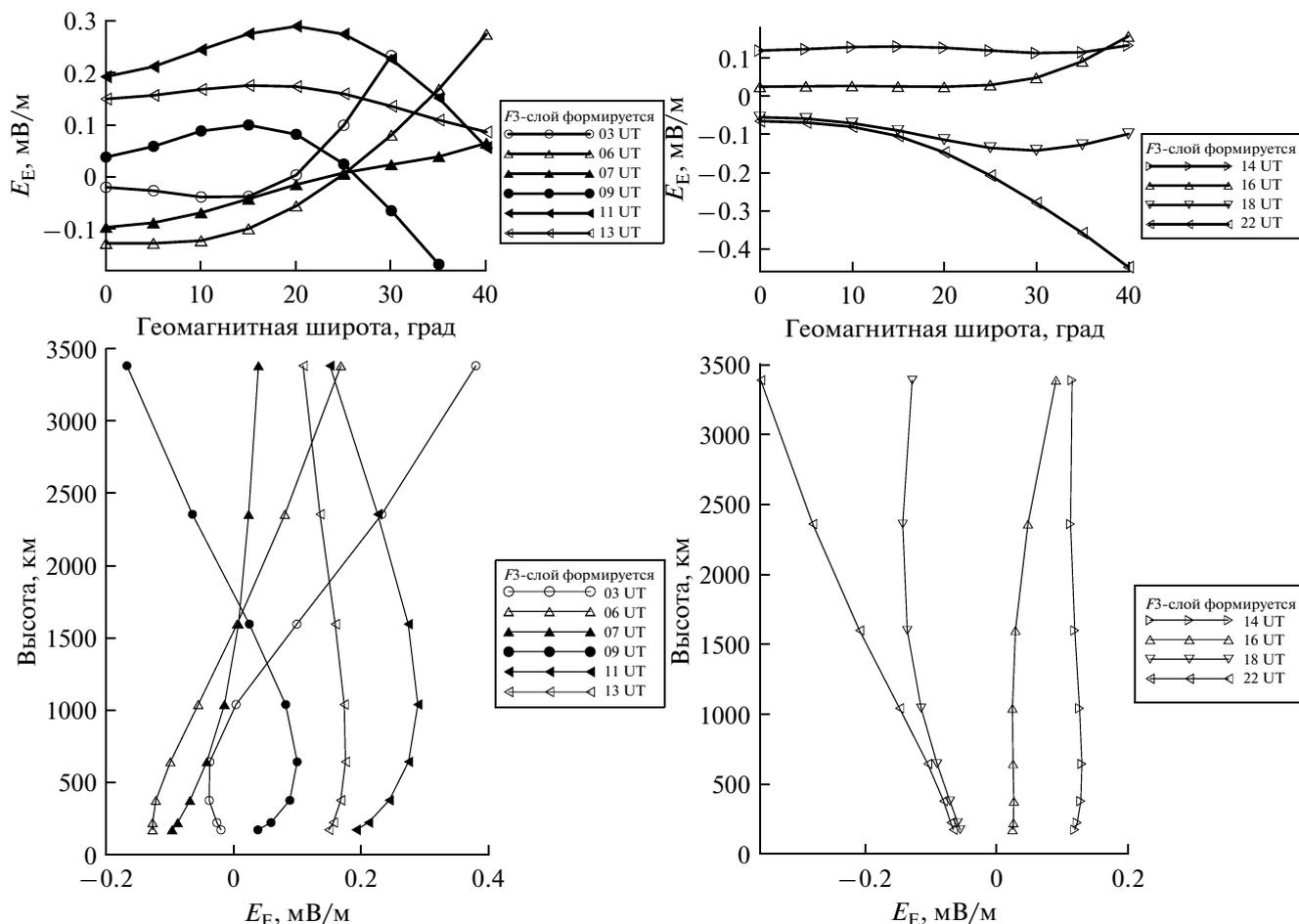


**Рис. 8.** Вверху – вертикальные профили электронной концентрации (сплошные линии) и концентрации атомарных ионов  $O^+$  и  $H^+$  (штриховые линии) в  $см^{-3}$ , рассчитанные в модели ГСМ ТИП для ст. Jicamarca для 05:00 и 11:00 UT. Внизу – широтно-высотные распределения меридиональной компоненты скорости термосферного ветра в м/с, рассчитанные для тех же моментов времени на геомагнитной долготе станции Jicamarca. Штриховыми линиями показаны силовые линии дипольного геомагнитного поля.

временем высота максимального эффекта опускается до  $\sim 250$  км в 05:00 UT. Все это приводит к уменьшению электронной концентрации в максимуме  $F2$ -слоя экваториальной ионосферы. Выше максимума  $F2$ -слоя эффект дрейфа вниз ослабевает, а начиная с некоторой высоты даже меняет знак за счет смены направления электромагнитного дрейфа. Вследствие этого электронная концентрация выше максимума  $F2$ -слоя уменьшается гораздо слабее, чем в максимуме  $F2$ -слоя, либо не меняется, либо возрастает, когда поле становится восточным. Все это приводит к начальному этапу формирования  $F3$ -слоя неоднородным по высоте зональным электрическим полем на экваторе, когда  $foF3 > foF2$ .

В 07:00 UT происходит перестройка широтно-го профиля зональной компоненты электрического поля, а следовательно, и ее вертикального

профиля на экваторе. После этого в широтном ходе зонального электрического поля формируется максимум восточного поля на некотором удалении от геомагнитного экватора, который со временем удаляется от экватора. Зональное электрическое поле вблизи геомагнитного экватора на высотах  $F$ -области становится восточным и неоднородным по высоте на геомагнитном экваторе (09:00–13:00 UT). Следует отметить, что необходимый для формирования расслоения  $F2$ -слоя вертикальный профиль зонального электрического поля существует в период с 09:00 до 11:00 UT, когда зональное поле в нижней части профиля становится восточным с максимумом на высотах сформировавшегося ранее  $F3$ -слоя. При этом восточное поле нарастает, достигая к 11:00 UT своего порогового значения 0.2 мВ/м. Именно в это время  $F3$ -слой наиболее ярко выражен в вертикальном профиле электронной концентрации. Кроме то-



**Рис. 9.** Широтные распределения зонального электрического поля в мВ/м вблизи геомагнитной долготы Лисамагса (вверху) и высотные профили зонального электрического поля в мВ/м над ст. Лисамагса (внизу), рассчитанные для различных моментов времени. Слева – моменты времени, когда  $F_3$ -слой существует, справа – моменты времени, когда  $F_3$ -слой отсутствует.

го, в 11:00 UT (06:00 LT в Лисамагса) включается источник фотоионизации за счет солнечного излучения, что приводит к увеличению концентрации в максимуме  $F_2$ -слоя. Неоднородное по высоте восточное электрическое поле и вызванный им неоднородный по высоте электромагнитный дрейф плазмы вверх с максимумом на высотах максимума  $F_3$ -слоя с появлением фотоионизации приводят к формированию расслоения экваториального  $F_2$ -слоя, т.е. к формированию максимумов  $F_2$ - и  $F_3$ -слоев и минимума между ними.

В 13:00 UT восточное электрическое поле уменьшается до 0.1 мВ/м и становится практически однородным по широте и, соответственно, по высоте на геомагнитном экваторе. Это, естественно, не приводит к поддержанию  $F_3$ -слоя. После 13:00 UT восточное электрическое поле уменьшается, изменяя со временем свое направление на западное, а его широтное распределение вблизи экватора и высотное распределение на самом экваторе (14:00–16:00 UT) становится более

однородным. При этом исчезают причины формирования неоднородностей в вертикальном профиле электронной концентрации вблизи геомагнитного экватора. Усиление фотоионизации в это время приводит к увеличению электронной концентрации в максимуме  $F_2$ -слоя, который со временем “поглощает”  $F_3$ -слой. В 14:00 UT  $F_3$ -слой исчезает. В дальнейшем на фоне западного электрического поля возникают неоднородности в высотном распределении зонального электрического поля на геомагнитном экваторе, которые, однако, имеют свои максимумы на очень больших высотах и поэтому не приводят к формированию неоднородностей в вертикальном профиле электронной концентрации на рассматриваемых высотах вблизи геомагнитного экватора.

Таким образом, мы показали, что  $F_3$ -слой в экваториальной ионосфере формируется не только восточной компонентой электрического поля с амплитудой не менее 0.2 мВ/м, но и западным электрическим полем. При этом, существенную

роль играет неоднородное распределение зонального электрического поля вблизи геомагнитного экватора и, как следствие, неоднородное по высоте распределение этого поля на самом экваторе. Описанный механизм формирования  $F3$ -слоя похож на механизм, предложенный в работе [Balan et al., 1998]. Однако, имеются некоторые отличия: 1)  $F3$ -слой формируется неоднородным по высоте дрейфом плазмы под действием неоднородного по высоте зонального электрического поля на геомагнитном экваторе; 2) меридиональная компонента электрического поля влияет на время появления, существования и исчезновения  $F3$ -слоя; 3)  $F3$ -слой может сформироваться в ночное время до появления расслоения экваториального  $F2$ -слоя.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Только при наличии зональной компоненты электрического поля  $F3$ -слой формируется ионами  $O^+$  в ночное время под действием неоднородного по высоте дрейфа плазмы на геомагнитном экваторе за счет неоднородного зонального электрического поля;

2. Расслоения экваториального  $F2$ -слоя ионосферы формируются только при наличии восточной компоненты электрического поля достаточно большой амплитуды ( $\geq 0.2$  мВ/м) в результате совместного действия неоднородного по высоте вертикального  $E \times V$ -дрейфа плазмы на геомагнитном экваторе и фотоионизации солнечным излучением;

3. Зональный  $E \times V$ -дрейф тепловой плазмы за счет меридиональной компоненты электрического поля и перенос плазмы вверх или вниз вдоль силовых линий геомагнитного поля под действием меридиональной компоненты термосферного ветра не оказывают влияния на формирование  $F3$ -слоя и на расслоение экваториального  $F2$ -слоя, но влияют на время их появления и исчезновения, а также на величину  $foF2$  и  $foF3$ ;

4.  $G$ -слой на высотах  $\sim 1000$  км связан с ночным среднеширотным максимумом в  $F$ -области ионосферы и формируется ионами  $H^+$  в ночное время за счет “сгонки” плазмы к вершинам плазменных трубок меридиональной компонентой термосферного ветра, имеющего неоднородное распределение по широте.

В дальнейшем предполагается продолжить исследования механизмов формирования дополнительных слоев в экваториальной ионосфере. Большой интерес представляет формирование этих слоев во время возмущений. Такие результаты уже приводились в работах [Balan et al., 2008; Lin et al., 2009], однако, в них не учитыва-

лась роль неоднородного по высоте зонального электрического поля на геомагнитном экваторе.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бенькова Н.П., Васильев К.Н., Коломийцев О.П., Прутенский И.С. Дополнительное расслоение электронной концентрации в слое  $F2$  вблизи экватора // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 18. № 6. С. 1033–1039. 1978.
- Васильев К.Н. Геомагнитный эффект в вертикальных перемещениях ионизации в области  $F$  ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 7. № 3. С. 4–9. 1967.
- Клименко В.В., Клименко М.В., Брюханов В.В. Численное моделирование электрического поля и зонального тока в ионосфере Земли – 1. Постановка задачи // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 46. № 4. С. 485–494. 2006.
- Клименко М.В. Численное моделирование крупномасштабного электрического поля и зонального тока в ионосфере земли // Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук Калининград: РГУ им. И. Канта. 2008.
- Клименко В.В., Клименко М.В. Численное моделирование расслоения  $F2$ -слоя и появление  $F3$ - и  $G$ -слоев в экваториальной ионосфере – морфология явлений // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 51. № 5. С. 657–667. 2011.
- Князева М.А., Намгаладзе А.А. Математическое моделирование формирования ночных повышений электронной концентрации в  $F2$ -области спокойной среднеширотной ионосферы и в плазмосфере Земли // Вестник МГТУ. Т. 8. № 1. С. 144–155. 2005.
- Намгаладзе А.А., Кореньков Ю.Н., Клименко В.В., Карпов И.В., Бессараб Ф.С., Суроткин В.А., Глущенко Т.А., Наумова Н.М. Глобальная численная модель термосферы, ионосферы и протоносферы Земли // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 30. № 4. С. 612–619. 1990.
- Прутенский И.С. Проявление на ионограммах динамических процессов, протекающих в ионосфере низких широт / Исследование структуры и волновых свойств приземной плазмы / Ред. Флигель Д.С. М.: ИЗМИРАН. С. 130–142. 1985.
- Прутенский И.С. Расслоение электронной концентрации во внешней низкоширотной ионосфере по данным ИСЗ “Космос–1809” // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 32. № 5. С. 99–103. 1992.
- Суроткин В.А., Намгаладзе А.А., Коломийцев О.П. Численное моделирование расслоений в слое  $F2$  приэкваториальной ионосферы / Ионосферномагнитосферные возмущения и их прогнозирование / Ред. Шашунькина В.М. и Ким В.П. М.: Наука. С. 148–154. 1984.
- Суроткин В.А., Намгаладзе А.А., Коломийцев О.П. Моделирование суточного развития расслоений  $F2$ -области экваториальной ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 25. № 3. С. 394–399. 1985.
- Суроткин В.А., Намгаладзе А.А., Коломийцев О.П. О физическом механизме формирования одного

- типа расслоения F<sub>2</sub>-области экваториальной ионосферы // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 32. № 15. С. 952–956. 1989.
- *Abdu M.A.* Coupling and energetics of the equatorial ionosphere-thermosphere system advances during the STEP period // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 61. № 1–2. P. 153–165. 1999.
- *Anderson D.N.* A theoretical study of the ionospheric F region equatorial anomaly – 1. Theory // Planet. Space Sci. V. 21. № 3. P. 409–419. 1973.
- *Balan N., Bailey G.J.* Equatorial plasma fountain and its effects: Possibility of an additional layer // J. Geophys. Res. V. 100. № 11. P. 21421–21432. 1995.
- *Balan N., Bailey G.J., Abdu M.A., Oyama K.I., Richards P.G., MacDougall J., Batista I.S.* Equatorial plasma fountain and its effects over three locations: Evidence for an additional layer, the F<sub>3</sub> layer // J. Geophys. Res. V. 102. № A2. P. 2047–2056. 1997.
- *Balan N., Batista I.S., Abdu M.A., MacDougall J., Bailey G.J.* Physical mechanism and statistics of occurrence of an additional layer in the equatorial ionosphere // J. Geophys. Res. V. 103. № A12. P. 29169–29182. 1998.
- *Balan N., Thampi S.V., Lynn K., Otsuka Y., Alleyne H., Watanabe S., Abdu M.A., Fejer B.G.* F<sub>3</sub> layer during penetration electric field // J. Geophys. Res. V. 113. № 9. A00A07. doi:10.1029/2008JA013206. 2008.
- *Batista I.S., Abdu M.A., MacDougall J., Souza J.R.* Long term trends in the frequency of occurrence of the F<sub>3</sub> layer over Fortaleza, Brazil. 10th International Symposium on Equatorial Aeronomy (ISEA) Antalya, May 17–24, 2000 // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 64. № 12–14. P. 1409–1412. 2002.
- *Fagundes P.R., Klausner V., Sahai Y., Pillat V.G., Becker-Guedes F., Bertoni F.C.P., Bolzan M.J.A., Abalde J.R.* Observations of daytime F<sub>2</sub>-layer stratification under the southern crest of the equatorial ionization anomaly region // J. Geophys. Res. V. 112. № 4. A04302. doi:10.1029/2006JA011888. 2007.
- *Farelo A.F., Herraiz M., Mikhailov A.V.* Global morphology of night-time NmF<sub>2</sub> enhancements // Ann. Geophysicae. V. 20. № 11. P. 1795–1806. 2002.
- *Hedin A.E.* Extension of the MSIS Thermosphere Model into the Middle and Lower Atmosphere // J. Geophys. Res. V. 96. № A2. P. 1159–1172. 1991.
- *Huang C.* A certain behavior of the ionospheric F<sub>2</sub> region at low latitudes // Radio Sci. V. 9. № 5. P. 519–532. 1974.
- *Huang C.* The traveling bifurcation of the equatorial F<sub>2</sub> layer // Radio Sci. V. 10. № 5. P. 507–516. 1975.
- *Jenkins B., Bailey G.J., Abdu M.A., Batista I.S., Balan N.* Observations and model calculations of an additional layer in the topside ionosphere above Fortaleza, Brazil // Ann. Geophysicae. V. 15. № 6. P. 753–759. 1997.
- *King J.W., Smith P.A., Eceles D., Fooks G.F., Helm F.* Preliminary investigation of the structure of the upper ionosphere as observed by the topside sounder satellite Alouette 1 // Proc. Roy. Soc. V. A281. № 1389. P. 464–487. 1964.
- *Kolomiitsev O.P., Reddy B.M., Surotkin V.A.* Sunrise effects in the equatorial F-layer // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 59. № 11. P. 1287–1297. 1997.
- *Lin C.H., Richmond A.D., Liu J.Y., Bailey G.J., Reinisch B.W.* Theoretical study of new plasma structures in the low-latitude ionosphere during a major magnetic storm // J. Geophys. Res. V. 114. № 5. A05303. doi:10.1029/2008JA013951. 2009.
- *Lynn K.J.W., Harris T.J., Sjarifudin M.* Stratification of the F<sub>2</sub> layer observed in Southeast Asia // J. Geophys. Res. V. 105. № A12. P. 27147–27156. 2000.
- *McClure J.P., Peterson V.L.* Plasma transport in the equatorial F region // Radio Sci. V. 7. № 5. P. 539–547. 1972.
- *Mikhailov A.V., Forster M., Leschinskaya T.Yu.* On the mechanism of the postmidnight winter NmF<sub>2</sub> enhancements. Dependence on solar activity // Ann. Geophysicae. V. 18. № 11. P. 1422–1434. 2000.
- *Namgaladze A.A., Korenkov Yu.N., Klimenko V.V., Karpov I.V., Bessarab F.S., Surotkin V.A., Glushenko T.A., Naumova N.M.* Global Model of the Thermosphere–Ionosphere–Protonosphere System // PAGEOPH. V. 127. № 2/3. P. 219–254. 1988.
- *Raghavarao R., Sivaraman M.R.* Ionization ledges in the equatorial ionosphere // Nature. V. 249. P. 331–332. 1974.
- *Rastogi R.G.* Upward moving irregularity (kink) in the equatorial ionosphere // Ann. Geophysicae. V. 29. № 3. P. 421–429. 1973.
- *Rishbeth H.* The equatorial F-layer: progress and puzzles // Ann. Geophysicae. V. 18. № 7. P. 730–739. 2000.
- *Sario T., Takeda M., Araki T., Sato T., Tsuda T., Fukao S., Kato S.* A midday bite-out event of the F<sub>2</sub>-layer observed by MU radar // J. Geomagn. Geoelectr. V. 41. № 8. P. 727–734. 1989.
- *Sen H.Y.* Stratification of the F<sub>2</sub> layer of the ionosphere over Singapore // J. Geophys. Res. V. 54. № 4. P. 363–366. 1949.
- *Woodman R.F., Sterling D.L., Hanson W.B.* Synthesis of Jicamarca Data during the Great Storm of March 8, 1970 // Radio Sci. V. 7. № 7. P. 739–746. 1972.