

УДК 550.388.2

О ФИЗИЧЕСКОМ МЕХАНИЗМЕ ФОРМИРОВАНИЯ ОДНОГО ТИПА РАССЛОЕНИЯ F2-ОБЛАСТИ ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ ИОНОСФЕРЫ

В. А. Суроткин, А. А. Намгаладзе, О. П. Коломийцев

Показано, что перемещающиеся вверх расслоения F2-области ионосферы, наблюдаемые вблизи геомагнитного экватора, могут быть обусловлены развитием широтных градиентов электронной концентрации, ведущих к неоднородности диффузионного потока плазмы в направлении поперек геомагнитного поля (к расщеплению фонтанных струй).

Под расслоениями F2-области экваториальной ионосферы понимают крупномасштабные неоднородности высотного распределения ионосферной плазмы на широтах, примыкающих к геомагнитному экватору. Они наблюдаются как ниже, так и выше главного ионосферного максимума и регистрируются как по данным вертикального ионосферного зондирования снизу [1, 2], так и по данным внешнего зондирования со спутников [3, 4] и некогерентного рассеяния [5]. Разнообразные формы проявления расслоений и их сложная морфология заставляют предполагать наличие нескольких механизмов их формирования. Так, например, в [6] показано, что вблизи магнитного экватора расслоения перемещаются по вертикали преимущественно вверх, а с удалением от экватора начинают преобладать расслоения, перемещающиеся вниз. Это позволяет предположить, что с удалением от экватора возрастает вклад внутренних гравитационных волн (ВГВ) в формировании расслоений, поскольку для ВГВ как раз и характерно распространение фазы возмущения по вертикали сверху вниз.

В настоящей работе мы хотим обсудить физический механизм расслоений, наблюдаемых непосредственно вблизи магнитного экватора и перемещающихся снизу вверх. Характерным примером этого типа расслоений являются результаты наблюдений высотных профилей электронной концентрации над магнитным экватором, полученные с помощью установки некогерентного рассеяния в Джикамарке [5] и показанные на рис. 1. Впервые расслоения этого типа были воспроизведены на простой численной модели ионосферы в работах [7, 8], однако физического истолкования результатов расчетов в этих работах дано не было. В работах [9, 10] аналогичные расслоения были воспроизведены на основе численного интегрирования системы уравнений непрерывности, движения и теплового баланса для плазмы, состоящей из ионов O_2^+ , NO^+ , O^+ и H^+ и электронов. Уравнения решались в дипольных координатах, и в расчетах учитывался трехмерный характер переноса плазмы: диффузия вдоль магнитного поля и электромагнитный дрейф (меридиональный и зональный) поперек магнитного поля. В этих расчетах детально исследовалось влияние электрических полей на развитие расслоений и было установлено, что появление расслоений контролируется интегральной по времени величиной зонального электрического поля и имеет место, когда максимум электронной концентрации поднимается достаточно высоко в область преобладания диффузии. Физическая интерпретация этих результатов дается ниже,

Рассмотрим совместно высотные профили плазменной частоты f_p над магнитным экватором для 10, 11, 12 и 13 часов местного времени (рис. 2) и изолинии плазменной частоты в меридиональной плоскости (рис. 3) для тех же моментов времени, рассчитанные для геомагнитного меридиана обсерватории Джикамарка ($\varphi=12^\circ S$, $\lambda=77^\circ W$), расположенной на геомагнитном экваторе. Расчеты проводились с учетом различия географических и геомагнитных координат для 24 января 1968 г. с использованием численной модели экваториальной ионосферы, описанной в [9, 10]. Стандартный вид решавшихся уравнений непрерывности, движения и теплового баланса здесь не приводится, он представлен в [9, 10]. В расчетах электрическое поле, направленное на восток и вызывающее дрейф плазмы вверх над магнитным экватором, задавалось в виде полупериода синусоиды с максимальным значением 1 мВ/м в 12^h LT. Обычно в спокойных условиях на экваторе наблюдаются электрические поля с амплитудами порядка 0,5 мВ/м, однако, как показано в [9, 10], величина поля влияет, главным образом, на время появления расслоений: чем меньше направленное на восток электрическое поле, тем позднее появляются расслоения. В частности, поля с амплитудами порядка 0,5 мВ/м приводят к появлению расслоений в послеполуденные часы (в 15—18^h LT), как это имеет место в случае, показанном на рис. 1. Сам же характер временной последовательности развития расслоений при этом не меняется, как это видно из сопоставления рис. 1 и рис. 2. Мы выбрали для настоящего анализа вариант расчетов с полем 1 мВ/м, поскольку расслоения в этом случае проявляются наиболее отчетливо. По оси абсцисс на рис. 3 отложена геомагнитная широта. Штриховыми кривыми на рис. 3 показаны силовые линии геомагнитного поля, положение вершин которых отмечено горизонтальными отрезками с буквами а, б, в, г на рис. 2.

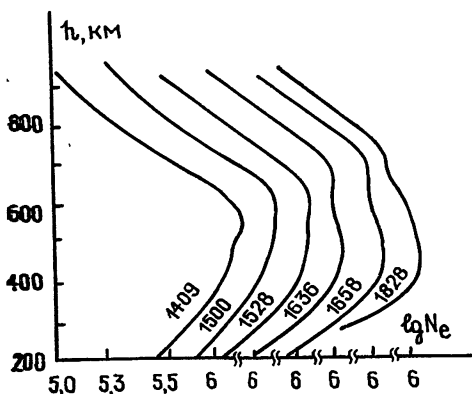


Рис. 1.

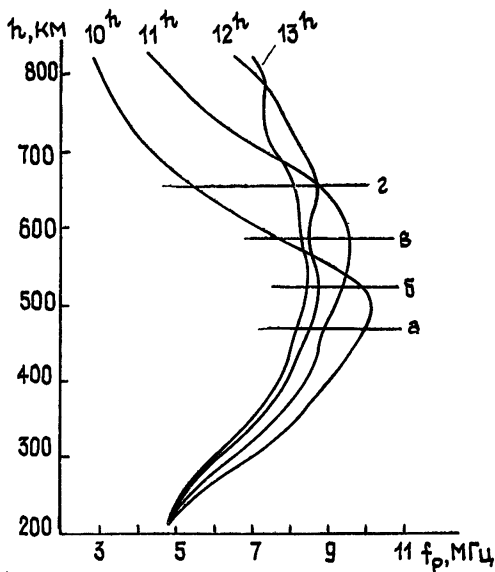


Рис. 2.

Из рис. 2 отчетливо видно, что расслоение F_2 -слоя (появление впадины на высотном профиле f_p), которое формируется после 10^h LT, сопровождается уменьшением критической частоты, т. е. формированием байт-аута — околорасслоения провала в суточном ходе $f_o F_2$ над магнитным экватором, связанного с выносом плазмы из области максимума F_2 -слоя над экватором вверх за счет электромагнитного дрейфа и в стороны за счет диффузии вдоль магнитного поля (фонтан-эффект). Одновременно развивается экваториальная аномалия (рис. 3).

В 10^h LT экваториальная аномалия практически еще не развита, хотя уже имеется дрейф плазмы вверх на экваторе и сброс ее по силовым линиям геомагнитного поля на широты $\sim \pm 10^\circ$. Высотный профиль f_p на экваторе отчетливого расслоения не выявляет. В 11^h LT экваториальная аномалия уже развита: появились «гребни» аномалии — области замкнутых изолиний на рис. 3, а на соответствующем профиле f_p на экваторе формируется перегиб на силовой линии, помеченной буквой а. Появление этого перегиба обусловлено тем, что вынос плазмы диффузией в стороны от экватора к областям гребней аномалии происходит неодинаково на разных силовых линиях. На силовых линиях, расположенных выше силовой линии а, диффузионный вынос замедляется уже накопившейся плазмой в гребнях аномалии (в областях замкнутых изолиний f_p на рис. 3), что и приводит к расслоению F2-слоя на экваторе. Действительно, на силовой линии а плазма диффундирует в стороны от экватора в интервале широт $\pm 5^\circ$ практически вдоль изолинии f_p , «ныряя» под гребень аномалии, т. е. не испытывая противодействия от градиента электронной концентрации, а на силовой линии в этом же интервале широт плазма диффундирует уже поперек изолиний и тормозится градиентом электронной концентрации. Происходит относительное накопление плазмы на силовых линиях, расположенных выше линии а, хотя максимальное значение концентрации плазмы над экватором, характеризуемое величиной f_0F_2 , при этом уменьшается за счет общего выноса плазмы (фонтан-эффекта).

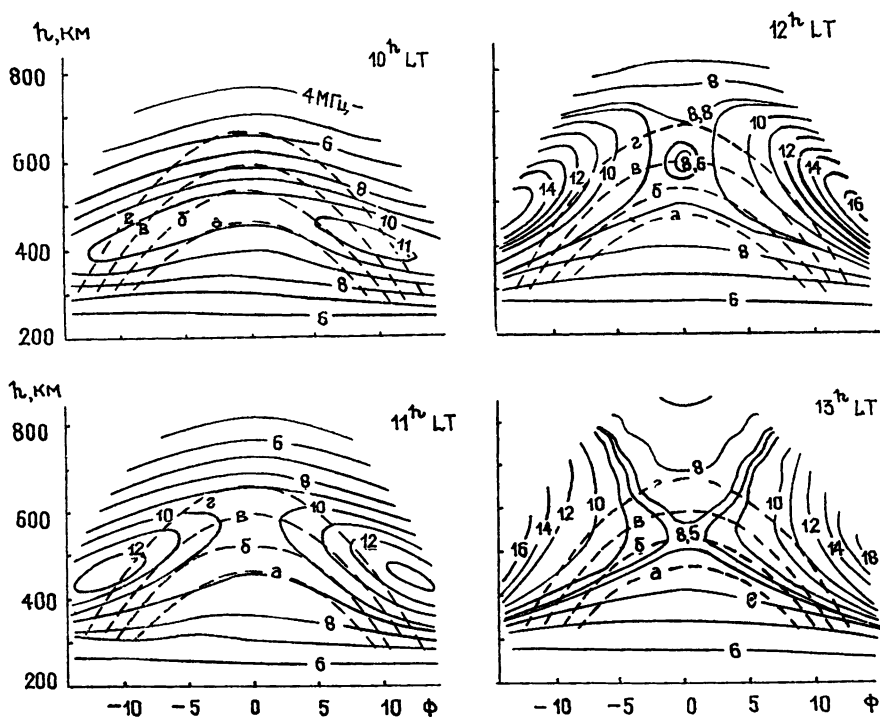


Рис. 3.

С дальнейшим развитием аномалии этот процесс усиливается. В 12^h LT области замкнутых изолиний f_p на рис. 3 простираются до больших высот, и вследствие этого возрастают градиенты электронной концентрации на более высоких силовых линиях геомагнитного поля. Соответственно замедляется диффузия на силовых линиях, расположенных выше силовой линии в. В результате впадина на профиле f_p (рис. 2) перемещается на силовую линию в и углубляется за счет относительного увеличения электронной концентрации на более высоких силовых ли

ниях. Для этого момента времени на рис. 4 справа представлен высотный профиль дивергенции диффузионного потока плазмы вдоль силовых линий на магнитном экваторе, а слева — высотный профиль плазменной частоты (тот же, что и на рис. 2). Видно, что впадина на профиле плазменной частоты образуется из-за того, что темп роста диффузионного оттока плазмы от вершины силовых линий растет с высотой и достигает величины относительного максимума на силовой линии в.

Таким образом, физической причиной формирования расслоений F_2 -слоя над магнитным экватором является развитие широтных градиентов электронной концентрации — гребней экваториальной аномалии. На силовых трубках геомагнитного поля, которые «упираются» в развитые гребни аномалии, диффузионный

вынос плазмы из области над экватором замедляется. Это приводит к относительному накоплению плазмы над экватором выше максимума F_2 -слоя вплоть до появления второго максимума. Образовавшаяся крупномасштабная неоднородность может в дальнейшем распадаться на более мелкие неоднородности (см. профиль f_p на рис. 2 для 13^h LT), поскольку расслоение развивается не только на самом экваторе, но и в прилегающих областях. Это ведет к тому, что сами гребни деформируются, как это видно из изолиний для 13^h LT на рис. 3, т. е. неоднородность на экваторе формирует неоднородности в гребнях, а те, в свою очередь, формируют новые неоднородности меньшего масштаба над магнитным экватором. Можно сказать, что происходит расщепление фонтанных струй: направленный вдоль геомагнитного поля диффузионный поток вначале монотонно меняется поперек геомагнитного поля, но по мере развития расслоений становится неоднородным в направлении поперек магнитного поля. Все явление в целом контролируется электрическим полем, поскольку именно оно контролирует развитие гребней экваториальной аномалии. Как уже отмечалось, расслоения развиваются тем раньше, чем больше величина электрического поля, поскольку тем раньше развиваются гребни аномалии. Перемещение расслоений вверх обусловлено общим подъемом плазмы вверх над магнитным экватором за счет электромагнитного дрейфа.

Итак, расслоения F_2 -области над магнитным экватором типа, показанного на рис. 1, могут возникать в ходе развития обычных для экваториальной ионосферы явлений: полуденного экваториального провала и экваториальной аномалии. Все три явления: полуденный провал, экваториальная аномалия и расслоение — тесно связаны между собой и контролируются электрическим полем. При развитых гребнях аномалии диффузионный вынос плазмы из области над экватором становится неоднородным в направлении поперек геомагнитного поля, что и ведет к формированию сначала крупномасштабных неоднородностей, а потом к распаду их на более мелкие масштабы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бенькова Н. П., Васильев К. Н., Коломийцев О. П., Прутенский И. С. // Геомагнетизм и аэронавигация. 1978. Т. 18. № 6. С. 1033.
2. Васильев К. Н., Коломийцев О. П., Прутенский И. С. // Геомагнетизм и аэронавигация. 1979. Т. 19. № 2. С. 227.
3. Raghavarao R., Sivaraman M. R. // Nature. 1974. V. 249. № 5455. P. 331.
4. Raghavarao R., Sivaraman M. R. // Space Res. 1975. V. 15. P. 385.

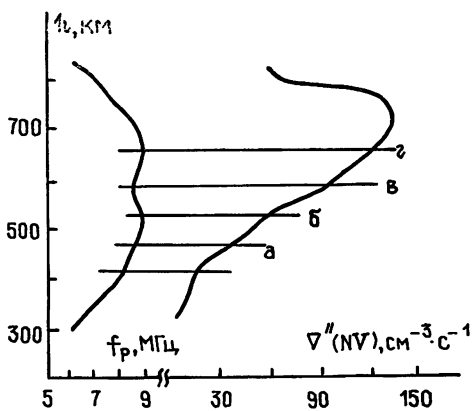


Рис. 4.

5. McClure J. P., Peterson V. L. // Radio Sci. 1972. V. 7. № 5. P. 539.
6. Васильев К. Н. // Геомагнетизм и аэрономия. 1967. Т. 7. № 3. С. 469.
7. Huang C. M. // Radio Sci. 1974. V. 9. № 5. P. 519.
8. Huang C. M. // Radio Sci. 1975. V. 10. № 5. P. 507.
9. Суроткин В. А., Намгаладзе А. А., Коломийцев О. П. В кн.: Ионосферно-магнитосферные возмущения и их прогнозирование. — М.: Наука, 1984. С. 148.
10. Суроткин В. А., Намгаладзе А. А., Коломийцев О. П. // Геомагнетизм и аэрономия. 1985. Т. 25. № 3. С. 394.

Институт земного магнетизма,
ионосферы и распространения
радиоволн АН СССР

Поступила в редакцию
4 декабря 1987 г.

ON THE PHYSICAL MECHANISM OF FORMATION OF ONE TYPE F2-REGION PATTERN SPLITTING IN THE EQUATORIAL IONOSPHERE

V. A. Surotkin, A. A. Namgaladze, O. P. Kolomiitsev

It is shown that the upward splitting of the ionospheric *F*-region which is observed in the vicinity of the geomagnetic equator is probably controlled by the latitudinal gradients of the electron density. This gradient causes the inhomogeneities of the plasma diffusion flux transversal to the geomagnetic field (i. e. the splitting of the jets).
