

УДК 550.388.2

ФЗ-СЛОЙ В ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ ИОНОСФЕРЕ: МОРФОЛОГИЯ И МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ

¹М.В. Клименко, ²В.В. Клименко, ²А.Т. Карпачев, ³К.Г. Ратовский, ³А.М. Веснин

F3-LAYER IN THE EQUATORIAL IONOSPHERE – MORPHOLOGY AND FORMATION MECHANISM

¹M.V. Klimenko, ¹V.V. Klimenko, ²A.T. Karpachev, ³K.G. Ratovsky, ³A.M. Vesnin

Данная работа посвящена исследованию F3-слоя в спокойных геомагнитных условиях и его вариаций во время геомагнитных возмущений. Это исследование базируется на данных наблюдений спутника Интеркосмос-19 (ИК-19) и цифровых ионозондов, а также результатах расчетов, полученных с использованием модели ГСМ ТИП.

This paper presents the research of F3-layer in quiet geomagnetic conditions and its variations during geomagnetic disturbances. This study is based on calculations performed by using the GSM TIP model, as well as Intercosmos-19 satellite observations and digital ionosonde data.

Введение

Формированию дополнительных слоев в F-области экваториальной ионосферы посвящено большое число работ, первая из которых была опубликована более 60 лет назад [Sen, 1949]. Во второй половине прошлого века было показано, что в экваториальной ионосфере достаточно регулярно в утренние часы местного времени выше максимума F2-слоя существует дополнительный максимум [Huang, 1974; 1975; Суроткин и др., 1985; Balan et al., 1997; 1998], который в дальнейшем стали называть F3-слоем. Однако пространственное распределение этого явления до сих пор не изучено. Для решения этой проблемы наиболее оптимальным представляется совместное использование данных наблюдений спутников и цифровых ионозондов.

В [Balan et al., 1998] было представлено детальное описание механизма формирования F3-слоя в утренние часы. Согласно последним результатам, представленным в [Клименко, 2011; Klimenko et al., 2011; Zhao et al., 2011; Клименко, 2012], F3-слой может появляться и в другие часы местного времени. В [Klimenko et al., 2011; Клименко, Клименко, 2012] был предложен и подтвержден модельными расчетами механизм формирования F3-слоя неоднородным по высоте вертикальным E×B дрейфом плазмы на геомагнитном экваторе. Этот механизм может объяснить появление дополнительных слоев в различные моменты местного времени для любых геомагнитных условий. В данной статье представлены примеры наблюдений дополнительных слоев в вечерние и ночные часы местного времени для различных геомагнитных условий по данным спутника Интеркосмос-19 (ИК-19) и цифрового ионозонда в Джикамарке, а также краткий анализ теоретических исследований по данному вопросу.

Результаты исследования

Электронная концентрация в максимуме F3-слоя может быть меньше или больше электронной концентрации в максимуме F2-слоя. В первом случае F3-слой может наблюдаться только со спутника, а во втором случае – как с поверхности Земли, так и со спутника, причем со спутника наблюдается только F3-слой и не наблюдается F2-слой, что вызывает определенные трудности в интерпретации данных наблюдений. В то же время для наземных наблюдений

это единственная возможность одновременно видеть на ионограммах F2- и F3-слой. Однако и при интерпретации наземных ионограмм могут возникнуть трудности, когда F2-слой быстро исчезает в послезакходные часы и появляется вероятность спутать временно исчезнувший F2-слой с F3-слоем. Для понимания механизма формирования F3-слоя необходимо проведение исследований с использованием модели верхней атмосферы. Эти этапы изучения F3-слоя отражены в статье.

1. F3-слой в экваториальной ионосфере по спутниковым данным

Спутники способны обеспечивать исследователей практически непрерывным по широте набором данных вблизи экватора. Широтное разрешение определяется режимом работы аппаратуры спутника. Например, аппаратура спутника ИК-19 в основном режиме зондировала ионосферу каждые 64 с, что соответствует измерениям с шагом по широте ~4°. Однако спутниковые исследования F3-слоя немногочисленны. Поэтому поведение F3-слоя по спутниковым данным изучено недостаточно. Примеры спутниковых исследований F3-слоя можно найти в [Sen, 1949; Lockwood, Nelms, 1964; Прутенский, 1992; Uemoto et al., 2006]. Однако, следует отметить, что именно с помощью спутниковых наблюдений было впервые показано появление дополнительных слоев в ночное время (00:00–04:00 LT) [Depuev, Pulinets, 2001].

На рис. 1 приведен пример ионограмм ИК-19 для вечерних и ночных условий, характеризующихся наличием перелома следов обыкновенной и необыкновенной компонент отраженного сигнала. Существование этих переломов на ионограммах означает наличие слоя F3. Перелом может быть как ярко выраженным, таким как на приведенных ионограммах, так и едва заметным. Из сказанного следует, что анализ ионограмм внешнего зондирования на предмет выделения характеристик слоя F3 является непростой задачей. Главным достоинством спутниковых данных при изучении вариаций F3-слоя является их глобальность и непрерывность.

2. Наблюдение F3-слоя с помощью ионозондов Экваториальный F3-слой довольно интенсивно исследовался по наземным данным [Sen, 1949; Balan et al., 1997; 1998; 2008; Lynn et al., 2000; Rama et al., 2005; Uemoto et al., 2007; Sreeja et al., 2010; Klimenko et al.,

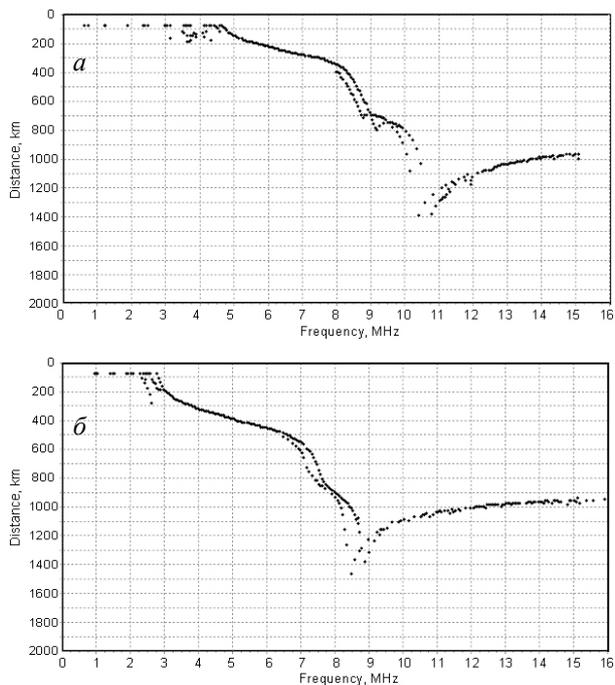


Рис. 1. Ионограммы ИК-19 вблизи геомагнитного экватора, полученные 4 июля 1979 г. для 17:30 LT (а) и 26 марта 1980 г. для 02:50 LT (б).

2011; Zhao et al., 2011]. Эти исследования позволили выделить основные особенности формирования F3-слоя. В [Balan et al., 1998] отмечается, что чаще всего F3-слой появляется вблизи геомагнитного экватора с 11:40 до 14:30 LT.

На рис. 2 показан пример ионограммы ионозонда DPS-4 на экваториальной станции Джикамарка, на которой F3-слой проявляется во время геомагнитной бури 11 сентября 2005 г. Отметим, что F3-слой, согласно ионограммам, существовал в течение ~1.5 ч, при этом его критическая частота и действующая высота монотонно возрастали. Следует отметить, что формирование дополнительных слоев над станцией Джикамарка 11 сентября 2005 г. было детально рассмотрено в [Klimenko et al., 2011].

Очевидно, что мировая сеть ионозондов предоставляет огромную базу данных для изучения вариаций F3-слоя в спокойные периоды и во время возмущений, связанных с воздействием на ионосферу сверху (процессы на Солнце и в магнитосфере) и снизу (процессы в литосфере и нижней атмосфере).

3. Модельные исследования формирования F3-слоя в экваториальной ионосфере

Пионерскими работами в моделировании расщепления экваториального F2-слоя являются [Huang, 1974; 1975]. Теоретические исследования, проведенные в последние 20 лет, показали, что F3-слой формируется вертикальным E×B дрейфом плазмы на геомагнитном экваторе под действием зонального электрического поля [Суроткин и др., 1985; Balan et al., 1997; 1998; Pulinets, 2001; 2008; Deruev, Lin et al., 2009; Klimenko et al., 2011; Клименко, 2012]. В [Balan et al., 1998] отмечается важная роль меридиональной компоненты термосферного ветра в пространственном положении F3-слоя. До последнего времени физический механизм формирования F3-слоя

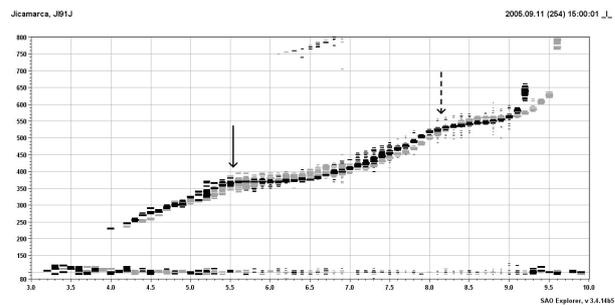


Рис. 2. Ионограмма ст. Джикамарка для 15:00 UT 11.09.05. Черные точки – обыкновенная составляющая отражения, серые – необыкновенная. Штриховой стрелкой отмечен F3-слой, сплошной – F1-слой.

был четко сформулирован только для утренних часов местного времени, хотя F3-слой наблюдается и в другие часы [Deruev, Pulinets, 2001; Zhao et al. 2011]. В [Клименко, 2011; Klimenko et al., 2011; Клименко, 2012] был предложен физический механизм, способный объяснить появление дополнительных слоев в любой момент местного времени. В этих же работах с помощью модели ГСМ ТИП [Namgaladze et al., 1988; Клименко и др., 2006] показано, что дополнительные слои (согласно [Sen, 1949; Klimenko et al., 2011] их может быть и несколько) формируются неоднородным по высоте дрейфом плазмы на геомагнитном экваторе. Отмечается, что меридиональная компонента электрического поля влияет на время появления, существования и исчезновения F3-слоя, что согласуется с выводами в [Суроткин и др., 1985]. Еще одним важным выводом является то, что F3-слой может формироваться в ночное время до появления расщепления экваториального F2-слоя, т. е. в то время, когда F2-слой отсутствует.

Следует отметить необходимость дальнейших исследований механизма формирования дополнительных слоев в экваториальной ионосфере. По нашему мнению, наиболее важными направлениями в данном исследовании являются экспериментальная проверка гипотезы о формировании F3-слоя неоднородным по высоте E×B дрейфом плазмы; выявление роли термосферных приливов и гравитационных волн в формировании дополнительных слоев; влияние солнечных, магнитосферных, атмосферных и литосферных возмущений на формирование, время жизни и количество дополнительных слоев.

Заключение

В данной работе представлены все возможные методы исследования дополнительных слоев в экваториальной ионосфере. Показана возможность появления дополнительных слоев в вечернее и ночное время. Неоднородный по высоте вертикальный E×B дрейф плазмы представляется наиболее вероятным механизмом для объяснения этого явления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Клименко В.В., Клименко М.В., Брюханов В.В. Численное моделирование электрического поля и зонального тока в ионосфере Земли. 1. Постановка задачи // Геомагн. аэрон. 2006. Т. 46, № 4. С. 485–494.
Клименко М.В., Клименко В.В. Численное моделиро-

вание расслоения F2-слоя и появления F3- и G-слоев в экваториальной ионосфере – морфология явлений // Там же. 2011. Т. 51, № 5. С. 637–647.

Клименко М.В., Клименко В.В. Механизмы расслоения F2-слоя и формирования F3- и G-слоев в экваториальной ионосфере // Там же. 2012. Т. 52 (в печати).

Пругенский И.С. Расслоение электронной концентрации во внешней низкоширотной ионосфере по данным ИСЗ «Космос–1809» // Там же. 1992. Т. 32, № 5. С. 99–103.

Суроткин В.А., Намгаладзе А.А., Коломийцев О.П. Моделирование суточного развития расслоений F2-области экваториальной ионосферы // Там же. 1985. Т. 25, № 3. С. 394–399.

Balan N., Bailey G.J., Abdu M.A., et al. Equatorial plasma fountain and its effects over three locations: Evidence for an additional layer, the F3 layer // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102. P. 2047–2056.

Balan N., Batista I.S., Abdu M.A., et al. Physical mechanism and statistics of occurrence of an additional layer in the equatorial ionosphere // *Ibid.* 1998. V. 103. P. 29169–29181.

Balan N., Thampi S.V., Lynn K., et al. F3 layer during penetration electric field // *Ibid.* 2008. V. 113. A00A07. doi:10.1029/2008JA013206.

Depuev V.H., Pulinets S.A. Intercosmos-19 observations of an additional topside ionization layer: The F3-layer // *Adv. Space Res.* 2001. V. 27. P. 1289–1292. doi:10.1016/S0273-1177(01)00205.

Huang C. A certain behavior of the ionospheric F2 region at low latitudes // *Radio Sci.* 1974. V. 9. P. 519–532.

Huang C. The travelling bifurcation of the equatorial F₂ layer // *Ibid.* 1975. V. 10, N 5. P. 507–516. doi:10.1029/RS010i005p00507.

Klimenko M.V., Klimenko V.V., Ratovsky K.G., et al. Numerical modeling of ionospheric effects in the middle and low-latitude F-region during geomagnetic storm sequence of September 9-14, 2005 // *Ibid.* 2011. V. 46. RS0D03. doi:10.1029/2010RS004590.

Lin C.H., Richmond A.D., Liu J.Y., et al. Theoretical study of new plasma structures in the low-latitude ionosphere during a major magnetic storm // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. A05303. doi:10.1029/2008JA013951.

Lockwood G.E.K., Nelms G.L. Topside sounder observations of the equatorial anomaly in the 75W longitude zone // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1964. V. 26, N 5. P. 569–580.

Lynn K.J.W., Harris T.J., Sjarifudin M. Stratification of the F2 layer observed over Southeast Asia // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105. P. 27147–27156.

Namgaladze A.A., Korenkov Yu.N., Klimenko V.V., et al. Global model of the thermosphere-ionosphere-protonosphere system // *Pure and Applied Geophysics (PAGEOPH)*. 1988. V. 127. P. 219–254.

Rama Rao P.V.S., Niranjana K., Prasad D.S.V.V.D., et al. Features of additional stratification in ionospheric F2 layer observed for half a solar cycle over Indian low latitudes // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. P. A04307. doi:10.1029/2004JA010646.

Sen H.Y. Stratification of the F2 layer of the ionosphere over Singapore // *Ibid.* 1949. V. 54. P. 363–366.

Sreeja V., Ravindran S., Pant T.K. Features of the F3 layer occurrence over the equatorial location of Trivandrum // *Ann. Geophys.* 2010. V. 28. P. 1741–1747. doi:10.5194/angeo-28-1741-2010.

Uemoto J., Ono T., Kumamoto A., Iizima M. Statistical analysis of the ionization ledge in the equatorial ionosphere observed from topside sounder satellites // *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 2006. V. 68. P. 1340–1351.

Uemoto J., Ono T., Maruyama T., et al. Magnetic conjugate observation of the F3 layer using the SEALION ionosonde network // *Geophys. Res. Lett.* 2007. V. 34. L02110. doi:10.1029/2006GL028783.

Zhao B., Wan W., Reinisch B., et al. Features of the F₃ layer in the low-latitude ionosphere at sunset // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. A01313. doi:10.1029/2010JA016111.

¹Западное отделение Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Калининград

²Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Москва

³Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск