

УДК 550.338.2

## ВАРИАЦИИ СТРУКТУРЫ ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ АНОМАЛИИ В ПЕРИОД ЛЕТНЕГО СОЛНЦЕСТОЯНИЯ ПО ДАННЫМ ИСЗ ИНТЕРКОСМОС-19

© 2020 г. А. Т. Карпачев\*

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн  
им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Россия

\*e-mail: karp@izmiran.ru

Поступила в редакцию 17.05.2019 г.

После доработки 16.07.2019 г.

Принята к публикации 26.09.2019 г.

По данным внешнего зондирования на спутнике Интеркосмос-19 для высокой солнечной активности детально рассмотрены изменения структуры летней экваториальной аномалии электронной концентрации с местным временем и долготой. Показано, что экваториальная аномалия начинает формироваться с ~08 LT при образовании зимнего (южного) гребня. Летний (северный) гребень отстает в развитии на ~2 ч. Он формируется на фоне низкоширотного максимума  $foF2$ . Днем северный гребень в среднем на ~3° отстоит дальше от геомагнитного экватора, чем южный. Положение гребней сильно изменяется с долготой. В развитии экваториальной аномалии наблюдается локальный максимум в 14 LT, он особенно ярко проявляется в восточном полушарии. Величина  $foF2$  над геомагнитным экватором и степень развития аномалии в 12–14 LT изменяются с долготой согласно изменениям вертикального дрейфа плазмы  $W$ . В 18 LT в развитии экваториальной аномалии наблюдается локальный минимум, затем, через 1.5–2.0 ч после вечернего всплеска  $W$  степень развития аномалии возрастает до максимума. Долготные вариации  $foF2$  и степени развития аномалии в интервале 20–22 LT также связаны с вариациями  $W$ . Степень развития аномалии после максимума падает, гребни уменьшаются по величине и сдвигаются к экватору. После полуночи максимумы  $foF2$  в области гребней аномалии, наоборот, оказываются дальше от геомагнитного экватора, что, по-видимому, связано с действием нейтрального ветра. К 04 LT экваториальная аномалия практически распадается и не проявляется как структура с 05 по 07 LT. Таким образом, при высокой солнечной активности хорошо выраженная экваториальная аномалия наблюдается с 12 до 24 LT.

DOI: 10.31857/S0016794020020066

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Экваториальная аномалия в электронной концентрации (ЭА) была обнаружена давно [Appleton, 1946] и исследовалась как по наземным, так и по спутниковым данным. Наземные данные ограничены и по широте, и, особенно, по долготе, поскольку обычно получают в трех долготных секторах: Азиатском, Американском и иногда в Африканском (см., например, [Lyon and Thomas, 1963; Rao and Malthotra, 1964; Thomas, 1968; Rush et al., 1969; Eccles and King, 1969; Rajaram, 1977; Walker, 1981]). Спутниковые данные регистрируются либо на фиксированной высоте, выше максимума слоя  $F2$  с помощью зонда Ленгмюра, либо во всей толще внешней ионосферы при зондировании сверху. К прямым зондовым измерениям относятся в первую очередь данные спутника CHAMP, орбита которого, постепенно снижаясь, находилась вблизи максимума слоя  $F2$  на высотах 465–300 км [Liu et al., 2007; Lei et al.,

2010], а также данные спутников Ariel [Hopkins, 1972] и ROCSAT [Chen et al., 2016], полученные на высотах 500–600 км и 600 км соответственно. Несколько исследований было проведено по данным внешнего зондирования на спутниках Alouette и ISIS, которые также были привязаны к пунктам приема телеметрии только в Азиатском и Американском долготных секторах [Lockwood and Nelms, 1964; King et al., 1967; Rush et al., 1969; Eccles and King, 1969; Sharma and Hewens, 1976]. Несмотря на ограниченность, все эти наблюдения позволили выделить основные характеристики ЭА, которые описаны в обзорах [Rajaram, 1977; Moffett, 1979; Walker, 1981; Sastri, 1990; Walker et al., 1994; Rishbeth, 2000]. Было показано, что характеристики ЭА сильно изменяются с высотой, долготой, местным временем, сезоном и солнечной активностью. Суточные и сезонные вариации, а также зависимость от солнечной активности можно исследовать любыми методами. Зави-

симось от высоты исследовалась, в основном, по данным внешнего зондирования. Наконец, зависимость от долготы в полной мере можно выделить только по спутниковым данным.

В данной работе исследуется структура ЭА в  $foF2$  по данным внешнего зондирования на спутнике Интеркосмос-19 (ИК-19), усредненным для северного лета, т.е. для мая–августа. До сих пор ИК-19 является единственным спутником, который регистрировал глобальное (на всех долготах) распределение электронной концентрации, включая вариации  $foF2$  и  $hmF2$ , для высокой солнечной активности. ИК-19 функционировал в 1979–1982 гг., однако только в последние годы трудоемкая первичная обработка данных внешнего зондирования была проведена методично, т.е. в полном объеме. Это позволило получить полную картину вариаций структуры ЭА в спокойных геомагнитных условиях для всех часов местного времени и всех сезонов. Детальное исследование характеристик ЭА для равноденственных условий представлено в нашей предыдущей работе [Карпачев, 2018]. Ниже представлено аналогичное исследование для условий летнего солнцестояния.

Главной целью настоящей работы является создание картины вариаций структуры ЭА в наиболее полном объеме. Поэтому, чтобы не перегружать работу, по ходу изложения будут делаться ссылки только на те результаты, которые непосредственно связаны с предметом анализа. Это в первую очередь относится к наземным данным. В последнее время было получено много данных по TEC с помощью приемников GPS. Они также привязаны к суше и не прямо соотносятся с вариациями  $foF2$ , тем не менее, несколько важных результатов будет привлечено для сопоставления с данными ИК-19 [Huang and Cheng, 1996; Zhao et al., 2009; Yizengaw et al., 2009]. Наконец, было получено огромное количество данных радиозатменных наблюдений, особенно в эксперименте FORMOSAT-3/COSMIC. Эти данные имеют глобальный характер, но они охватывают период, в основном, с низкой солнечной активностью. Однако они также представляют интерес, поскольку позволяют выявить общее в структуре ЭА при разной солнечной активности [Ram et al., 2009; Luan et al., 2015; Yue et al., 2015].

## 2. ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ

Спутник ИК-19 функционировал в активном режиме с марта 1979 г. по февраль 1981 г. Этот период характеризовался высокой солнечной активностью: среднее значение  $F10.7 \sim 200$ . Спутник обращался на эллиптической орбите с высотами 500–1000 км и наклоном  $74^\circ$ . На борту спутника находилось записывающее устройство, которое позволяло регистрировать цифровые

ионограммы на любой долготе в пределах наклона орбиты. Из ионограмм рассчитывались  $N(h)$ -профили внешней ионосферы, которые давали значения  $foF2$  и  $hmF2$ . Эти значения использовались для построения распределения параметров максимума слоя  $F2$  в области экваториальной аномалии в пределах  $\pm 70^\circ$  геомагнитного наклона. К летним условиям относятся май–август в 1979 и 1980 гг., т.е. 8 месяцев за два года работы спутника. Всего за этот период было получено 87000 пар значений  $foF2$  и  $hmF2$  для спокойных условий  $Kp \leq 3$ . Этого оказалось достаточно для построения 12 так называемых LT-карт через каждые 2 ч местного времени, при этом на одну карту приходится 3000–4000 значений  $foF2$  или  $hmF2$ . Карты строились рутинной программой Surfer методом обратных расстояний. Данные для каждой карты равномерно покрывали все долготы, поэтому в результате получалось довольно гладкое распределение  $foF2$  и  $hmF2$ , что является косвенным подтверждением адекватности полученных данных. В данной работе рассматриваются только вариации  $foF2$ .

## 3. РАЗВИТИЕ ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ АНОМАЛИИ

На рисунке 1 представлено распределение  $foF2$  в период развития ЭА, а именно: для 08, 10, 12 и 14 LT, а на рис. 2 приведены широтные профили  $foF2$  в наиболее характерных долготных секторах  $90^\circ$  и  $300^\circ$ . В первом, геомагнитный экватор расположен максимально далеко к северу от географического экватора, а, во втором, наоборот, – к югу. Из обоих рисунков видно, что сначала, с 08 LT, появляется зимний, т.е. южный гребень. Он появляется на широте  $\sim 10^\circ$  в Американском долготном секторе и на  $\sim 20^\circ$  на остальных долготах. В северном полушарии на всех долготах в это время наблюдается небольшой максимум  $foF2$ , но он расположен слишком далеко для нормального гребня ЭА, образованного фонтан-эффектом. В результате минимум  $foF2$  оказывается сдвинутым в летнее полушарие, и это не экваториальный провал концентрации, связанный с ЭА.

Северный (летний) гребень начинает формироваться только с 10 LT и только на долготах  $90^\circ$ – $210^\circ$ . На остальных долготах летний гребень отсутствует, что в особенности справедливо для долгот Америки, как показывает широтный разрез  $foF2$  на рис. 2 для 10 LT в долготном секторе  $300^\circ$ . Пик  $foF2$  на долготе  $300^\circ$  по-прежнему является низкоширотным или даже среднеширотным максимумом, связанным скорее всего с действием нейтрального ветра. Широтный профиль  $foF2$  на долготе  $90^\circ$  демонстрирует сложную динамику развития северного гребня, видно, что он формируется на фоне среднеширотного максимума  $foF2$ . Северный гребень на всех долготах образу-

ется только к 11 LT, он начинает сравниваться с зимним гребнем по величине ближе к полудню, и даже в 14 LT он немного меньше южного, зимнего. Таким образом, летом, при высокой солнечной активности, ЭА в ее обычном виде, с двумя хорошо развитыми гребнями формируется только к полудню. К этому времени ЭА лучше всего развита на долготах  $90^{\circ}$ – $120^{\circ}$  по сравнению с другими долготами. В Американском долготном секторе ЭА не только более слабо развита, но и формируется позже – рис. 2.

Обсудим, как все это согласуется с другими данными. В обзоре [Walker, 1981], основанном на наземных данных, утверждалось, что при любом солнцестоянии и в любом долготном секторе зимний гребень развивается раньше, и он больше по величине. Хотя в более ранней работе Walker and Chan [1976] анализировали данные внешнего зондирования на спутниках Alouette-2 and ISIS-1 для ноября 1969–января 1970 г., т.е. для высокой активности, в секторе  $105^{\circ}$ , и обнаружили обратную асимметрию: днем летний (южный) гребень оказался на 8% больше и на  $8^{\circ}$  DIP дальше от экватора. Точно так же летний гребень преобладал и по данным Alouette-1, полученным для низкой солнечной активности в ноябре 1962 и июне 1963 г. на меридиане  $75^{\circ}$  W [Rush et al., 1969]. Что касается запаздывания в развитии ЭА на долготах Америки, его отмечали во многих ранних исследованиях. Однако анализ показывает, что они относятся, в основном, к низкой солнечной активности и (или) равноденствию (см., например, [Lyon and Thomas, 1963; Sharma and Hewens, 1976]). Для летних условий высокой активности это отмечалось только в работах по наземным [Rajaram, 1977] и по спутниковым [Hopkins, 1972] данным, при том, что и в последней работе рассматривались на самом деле смешанные условия (7 июля–18 октября). Мало того, в работе [Thomas, 1968] утверждалось по наземным данным для лета 1958 г., что в Американском секторе ЭА наблюдалась уже в 08 LT, а в Африканском появилась только к 12 LT. При этом в Африканском секторе днем (14 LT) северный гребень был больше. Таким образом, если судить по ранним результатам, вырисовывается довольно противоречивая картина. Более поздние исследования ЭА в терминах  $foF2$  для летних условий высокой активности в литературе отсутствуют. Можно отметить только работу [Zhao et al., 2009] по анализу ТЕС в Азиатском–Австралийском регионе. Вариации ТЕС совершенно четко показывают, что при высокой активности ( $F10.7 > 150$ ) в летнее и зимнее солнцестояния зимний гребень и появляется, и распадается раньше, чем летний. По-видимому, этот вывод и следует считать окончательным.

По мере развития ЭА оба гребня постепенно удаляются от экватора, максимальная широта в 14 LT зависит от долготы и находится в диапазоне

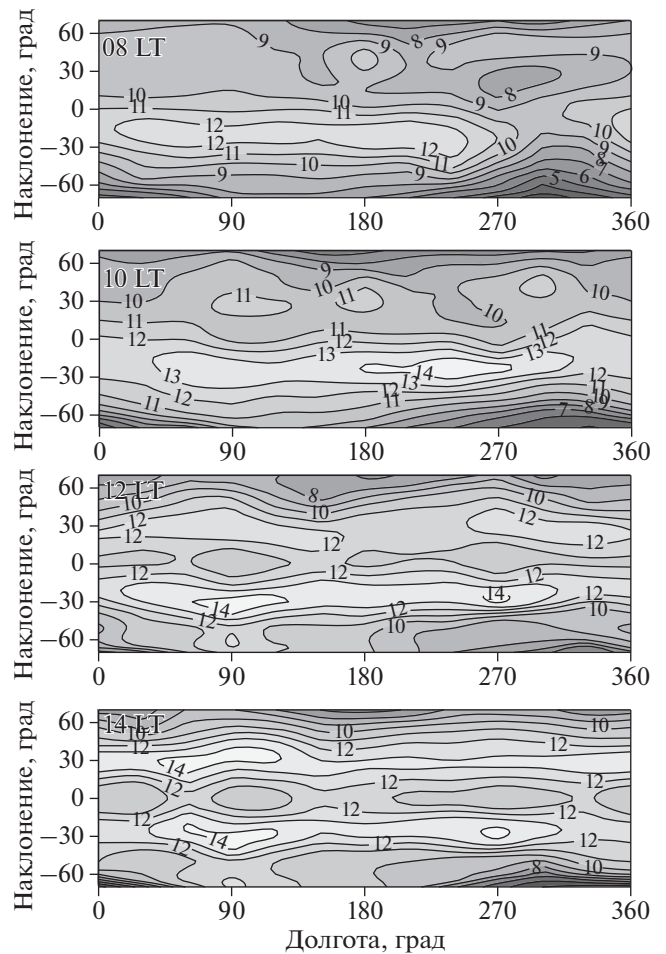


Рис. 1. Распределение  $foF2$  (LT-карты) в период развития ЭА для 08, 10, 12 и 14 LT.

$23^{\circ}$ – $33^{\circ}$   $I$  в северном полушарии и на  $1^{\circ}$ – $2^{\circ}$  меньше – в южном. Зависимость величины и положения гребней от долготы также детально обсуждалась во многих работах (см., например, обзор [Walker, 1981]). Она определяется, в основном действием обеих компонент нейтрального ветра. Меридиональный ветер направлен к полюсу от подсолнечной точки, поэтому в зависимости от сезона и разницы между географическим и геомагнитным экваторами, он будет по-разному действовать на гребни ЭА, уменьшая гребень в одном и увеличивая в другом случае. А действие зонального ветра зависит от склонения геомагнитного поля, при смене знака склонения его эффект (при фиксированном местном времени) изменится на противоположный. Наконец влияет и то, где находится подсолнечная точка, т.е. где днем сильнее ионизация солнечным излучением. Однако, хотя разница по долготе в положении гребней достигает  $10^{\circ}$ , в среднем нет сильной асимметрии ни в величине, ни в положении гребней. Это довольно неожиданный вывод, потому

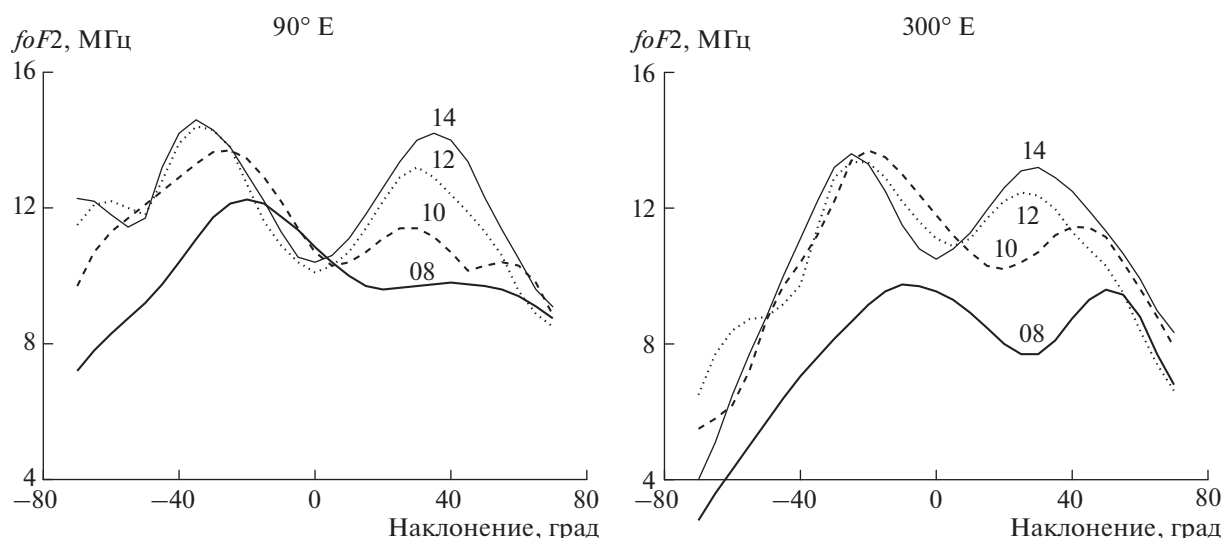


Рис. 2. Широтные вариации  $foF2$  для 08, 10, 12 и 14 LT в наиболее характерных долготных секторах  $90^\circ$  и  $300^\circ$ .

что во многих исследованиях делается акцент на сильной асимметрии ЭА во время солнцестояний. Например, по данным Alouette-1 за октябрь 1962–декабрь 1964 г. на долготах Америки  $90^\circ$ – $55^\circ$  W в летние месяцы, северный гребень находился на  $\sim 10^\circ$  DIP дальше от экватора, чем южный [Sharma and Hewens, 1976]. Для сравнения на рис. 2 разница в положении гребней в долготном секторе  $300^\circ$  в 14 LT составляет всего  $3^\circ$ – $4^\circ$ . Еще меньшая разница ( $2^\circ$ – $3^\circ$ ) была зафиксирована в цитированной выше работе [Zhao et al., 2009]. К 14 LT величина  $foF2$  в гребнях экваториальной аномалии достигает максимальных значений 14–15 МГц и сохраняется такой весь дневной период.

Был обнаружен только один пример распределения  $foF2$  для 12 LT, который можно прямо сравнить с распределением для 12 LT на рис. 1. Он был получен по данным COSMIC для июня и относится к низкой солнечной активности  $F10.7 = 76.4$  [Zeng et al., 2007]. Тем интереснее, что это распределение по структуре хорошо согласуется с рис. 1. Это означает, что несмотря на большие отличия в поведении ЭА при высокой и низкой солнечной активности, в полдень ее структура определяется одними и теми же причинами. Отметим, что в обоих случаях экваториальный провал  $foF2$  в 12–14 LT на всех долготах находится строго на геомагнитном экваторе. С другой стороны, в работе [Liu and Watanabe, 2008] было получено распределение плотности ионов для 12 LT в июне по данным спутника CHAMP, приведенным к высоте 400 км. Это распределение гораздо ближе по геофизическим условиям к данным ИК-19, поскольку также относится к высокой солнечной активности, но оно гораздо хуже соответствует распределению  $foF2$  на рис. 1. Следовательно,

сравнению разных данных (для разных сезонов) стоит посвятить отдельную публикацию.

Рассмотрим долготные вариации параметров дневной ЭА. Вариации  $foF2$  с долготой на экваторе были впервые выделены по данным ИК-19 [Карпачев, 1988]. На рисунке 3 сверху сплошной кривой приведены вариации  $foF2$  над экватором, усредненные для 12–14 LT с шагом  $30^\circ$  по долготе. Хорошо известно, что они определяются вариациями скорости вертикального дрейфа плазмы  $W$  – штриховые кривые на рис. 3. Вариации скорости вертикального дрейфа плазмы  $W$  над экватором приведены для 10–12 LT, т.е. в период развития ЭА. (Положительные значения означают дрейф вверх). Они были получены по данным спутника ROCSAT-1 для летних (май–август) спокойных условий в 1999–2004 г. для высокой солнечной активности [Fejer et al., 2008]. Из рисунка 3 видно, что, действительно, вариации  $foF2$  следуют за вариациями  $W$ , кроме долготного сектора  $240^\circ$ – $300^\circ$ , где  $foF2$  намного меньше, чем следовало бы ожидать. При этом, электронная концентрация в этом долготном секторе понижена на всех широтах, включая гребни аномалии. В итоге, отношение  $foF2$  в максимуме гребней и над экватором на долготе  $270^\circ$  хотя и меньше, но не намного, чем на долготе  $90^\circ$ . Таким образом, можно констатировать, что днем степень развития ЭА в Американском долготном секторе на самом деле не намного меньше, как и Азиатском. Наименее развита ЭА днем на долготах  $150^\circ$ – $210^\circ$ . Еще раз в этой связи напомним о работе [Thomas, 1968], цитированной выше.

Отметим также, что все рассмотренные величины показывают наличие 4 гармоник по долготе с близкими максимумами и минимумами. Этот факт нашел отражение в интенсивно исследуе-

мой в последнее время концепции “4 wave” (см., например, [Ram et al., 2009]). Она предполагает влияние нижней атмосферы на ионосферу области *E*, а следовательно, и на величину вертикального дрейфа (см., например, работу [Pancheva and Mukhtarov, 2012] и ссылки в ней). В середине рис. 3 сплошной кривой показаны долготные вариации степени развития ЭА как отношение *foF2* в гребнях к *foF2* в экваториальной впадине, т.е.  $EAI = foF2_{Г} / foF2_{Э}$ . Значения *foF2* в северном и южном гребнях аномалии при этом усреднялись. Вариации степени развития ЭА также были получены усреднением данных для 12–14 LT. Они подобны вариациям *W* и также показывают наличие 4 гармоник.

На рисунке 3 внизу приведены долготные вариации положения гребней ЭА для 08, 10, 12 и 14 LT. Их динамика в период развития ЭА уже, частично, обсуждалась. Сначала появляется зимний гребень аномалии. По мере развития ЭА он на всех долготах удаляется от экватора и растет по величине. При этом положение гребня в полдень очень сильно меняется с долготой – от 18° *I* в Американском секторе до 32° *I* в Азиатском секторе. Эти изменения связаны со степенью развития ЭА, о чем уже говорилось выше. Летний, т.е. северный гребень начинает проявляться только в 10 LT и только к полудню он формируется на всех долготах. Его положение также довольно сильно изменяется с долготой. Штриховой линией на долготах 270°–300° в северном полушарии показано положение низкоширотного, довольно четко выраженного максимума *foF2* – рис. 2. Его, вообще говоря, можно принять за гребень ЭА, что сильно затрудняет анализ. Отметим также, что на долготах 150°–180° северный гребень в 10 LT находится дальше от экватора, чем в 12 LT. Все это связано со сложной динамикой формирования северного гребня на фоне низкоширотного максимума *foF2*. Оба гребня в 14 LT еще немного отходят от экватора, но не на всех долготах, а в среднем. Расстояние между гребнями в 14 LT составляет в терминах магнитного склонения 65° *I* в долготном секторе 90°, 58° *I* на долготе 270° и только 47° *I* на долготе 330°. Последние значения не согласуются с данными спутника Alouette для Американского сектора (55°–90° *W*), согласно которым ширина ЭА составляла 65° *I* при высокой солнечной активности (58° *I* – при низкой) [Sharma and Hewens, 1976]. Положения обоих гребней из этой работы для 14 LT в условиях летнего солнцестояния и низкой солнечной активности приведены на рис. 3 кружками. В южном полушарии соответствие хорошее. А северный гребень, по данным Alouette, находится ровно посередине между “истинным” гребнем ЭА и низкоширотным максимумом, который наблюдался в 08 LT, и который явно не связан с ЭА. Это наводит на мысль о том, что при низкой активности

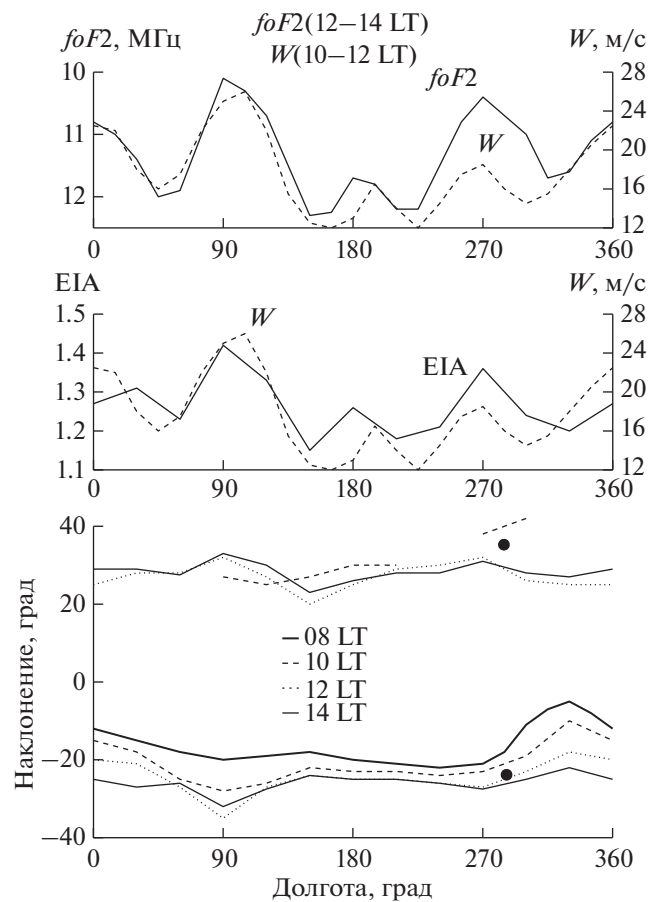


Рис. 3. Долготные вариации *foF2* и *W* (вверху), *EAI* и *W* (в середине) и положения гребней для разных часов местного времени (внизу). Кружками показано положение гребней по данным спутника Alouette для 14 LT [Sharma and Hewens, 1976].

даже в полдень гребень и низкоширотный пик *foF2* образуют общий максимум.

#### 4. ВЕЧЕРНЕЕ УСИЛЕНИЕ ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ АНОМАЛИИ

После того, как ЭА в 14 LT достигла максимального развития, она несколько часов находится в относительно стабильном состоянии. Ситуация быстро меняется в вечерние часы. Вечером в экваториальной ионосфере действуют конкурирующие факторы: вертикальный дрейф и диффузия, рекомбинация и нейтральный ветер [Balap and Baily, 1995]. Поэтому динамика ЭА в это время довольно сложная. На рисунке 4 приведено распределение *foF2* для 16, 19 и 20 и 22 LT, а на рис. 5 – широтные профили *foF2* для 18, 20 и 22 LT в долготных секторах 90° и 300°. Из обоих рисунков четко прослеживается динамика ЭА в вечерние часы. Первая карта в реальности описывает ситуацию в экваториальной ионосфере для 16–17 LT. Она не сильно отличается от ситуации для 14 LT,

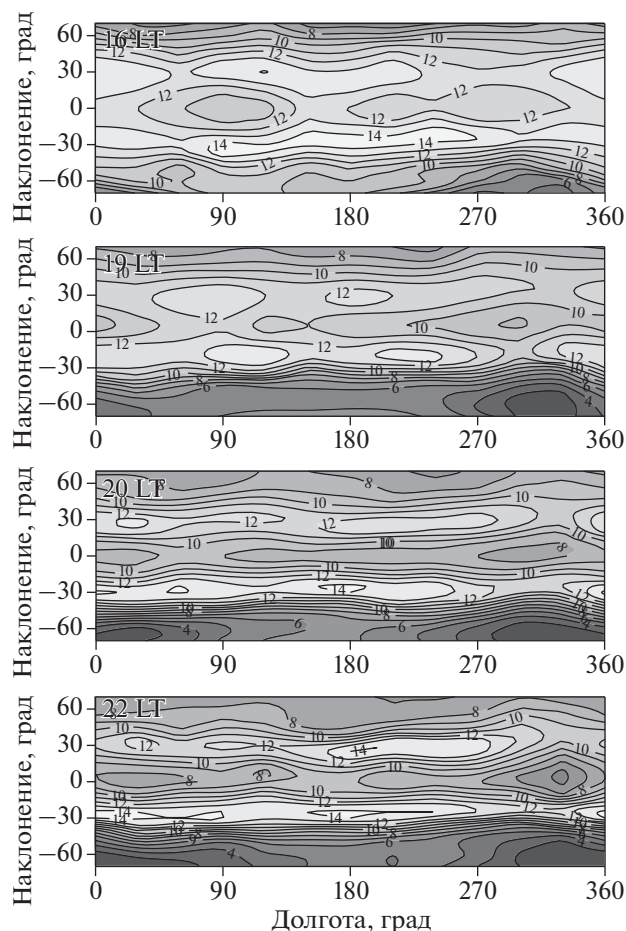


Рис. 4. Распределение  $foF2$  для 16, 19, 20 и 22 LT.

ЭА по-прежнему хорошо развита, электронная концентрация в максимумах гребней остается высокой, 13–14 МГц. Вторая карта описывает ситуацию присущую для 18–19 LT. В это время электронная концентрация на низких/средних

широтах уменьшается к вечеру с уменьшением освещенности ионосферы в результате рекомбинации. Электронная концентрация в гребнях уменьшается, а над экватором почти не меняется, поэтому степень развития ЭА немного уменьшается по сравнению с дневными часами. На рисунке 6 внизу приведены долготные вариации положения гребней. Видно, что в 19 LT оба гребня практически на всех долготах находятся максимально близко к экватору. Широтные профили  $foF2$  для 18 LT на рис. 5 приведены, чтобы продемонстрировать, насколько быстро падает электронная концентрация к 20 LT. При этом на долготе  $90^\circ$  южный зимний гребень в 20 LT становится намного больше, чем северный, а на долготе  $300^\circ$  они одинаковые. Такое поведение гребней в летних условиях наблюдалось по наземным данным еще в работе [Thomas, 1968]. Скорость вертикального дрейфа, направленного вверх, в 18–19 LT возрастает, а после 20 LT дрейф меняет направление на противоположное. Оба этих эффекта приводят к усилению ЭА [Balan and Baily, 1995]. При усилении ЭА  $foF2$  над экватором уменьшается, поскольку выносятся дрейфом и диффузией в максимумы гребней, и достигает минимума в 22 LT – рис. 5. Гребни расходятся от экватора (рис. 6), а их величина поддерживается на высоком уровне этим процессом, что особенно хорошо видно на примере южного гребня в долготном секторе  $90^\circ$ . Средние значения  $foF2$  в максимуме гребней вечером не сильно отличаются от дневных, но в отдельные дни они достигают 15–16 МГц.

Вечером вся структура ЭА также как и в полдень довольно сильно изменяется с долготой – рис. 6. Однако вариации имеют совершенно другой характер, и не только потому, что 4-модовая структура в них отсутствует. На рисунке 6 вверху и в середине соответственно приведены долготные вариации  $foF2$  над экватором и степени развития ЭА, усредненные для 19–20 LT. Там же

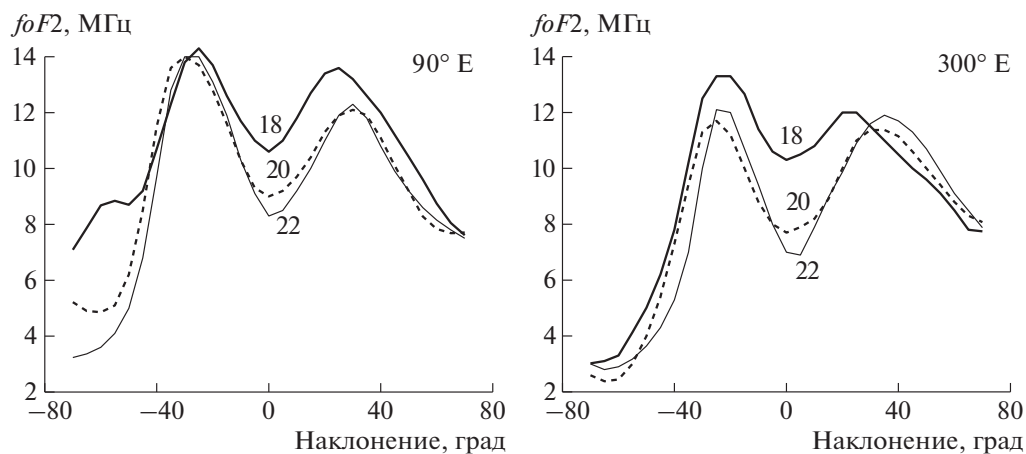


Рис. 5. Широтные вариации  $foF2$  для 18, 20 и 22 LT в долготных секторах  $90^\circ$  и  $300^\circ$ .

штриховой кривой показаны изменения скорости вертикального дрейфа плазмы  $W$ . Они были получены по данным спутника ROCSAT-1 для летних условий при высокой солнечной активности [Fejer et al., 2008]. Числовые значения  $W$  были оцифрованы с цветного рис. 4 этой работы для ~19 LT и возможно не совсем точно оценивают вариации скорости дрейфа. Тем не менее, из рис. 6 видно, что вариации степени развития ЭА, также как и в период ее формирования (рис. 3), довольно четко определяются вертикальным дрейфом плазмы. Задержка составляет 1.0–1.5 ч, она связана, в основном, с временем действия диффузии [Moffett, 1979]. И снова вариации  $foF2$  не следуют за вариациями  $W$  только в Американском долготном секторе 270°–330°: вместо увеличения  $foF2$  при уменьшении  $W$  электронная концентрация в максимуме слоя  $F2$ , наоборот, уменьшается. И снова она уменьшается на всех широтах в этом долготном секторе, включая и гребни аномалии – рис. 5. В итоге отношение  $foF2$  в гребнях и над экватором показывает менее развитую ЭА, так что корреляция  $W$  и EAI не нарушается и в Американском секторе. Еще более слабо ЭА развита на долготах Азии. Т.е. ситуация обратная той, которая наблюдалась днем – рис. 3, теперь ЭА наиболее сильно развита на долготах 0° и 180°. После 20 LT ЭА на всех долготах еще немного усиливается, хотя в положении гребней это практически не сказывается. Отметим, что ближе всего к экватору гребни находятся в 19 LT. В период 20–22 LT наблюдается сильная асимметрия ЭА – по величине гребней в Азии и по их положению в Америке – рис. 5 и рис. 6.

Поскольку скорость вертикального дрейфа сильно изменяется с долготой, не только  $foF2$ , но и весь профиль электронной концентрации будет изменяться с долготой. На рисунке 7 приведены  $N(h)$ -профили для трех характерных долготных секторов. Для того чтобы избежать вариаций день ото дня они были получены усреднением нескольких профилей в интервале 19–20 LT в долготных секторах 60°–90°, 180°–210° и 300°–310°. Профили отбирались для спокойных геомагнитных условий в диапазоне широт  $\pm 5^\circ I$ . Как видно из рис. 7, на долготах 60°–90° значения  $foF2$  максимальные, а  $hmF2$  – минимальные. В долготном секторе 180°–210°  $foF2$  меньше, а слой  $F2$  значительно выше, в итоге электронная концентрация во всей внешней ионосфере высокая. Все это объясняется хорошо известным действием вертикального дрейфа плазмы: чем выше скорость дрейфа вверх, тем сильнее электронная концентрация выносится на большие высоты, следовательно, в максимуме слоя  $F2$  она уменьшается, а на больших высотах увеличивается. Слой  $F2$  при этом поднимается. В долготном секторе 300°–310° скорость вертикального дрейфа такая же низкая, как и на долготах 60°–90°, но здесь на-

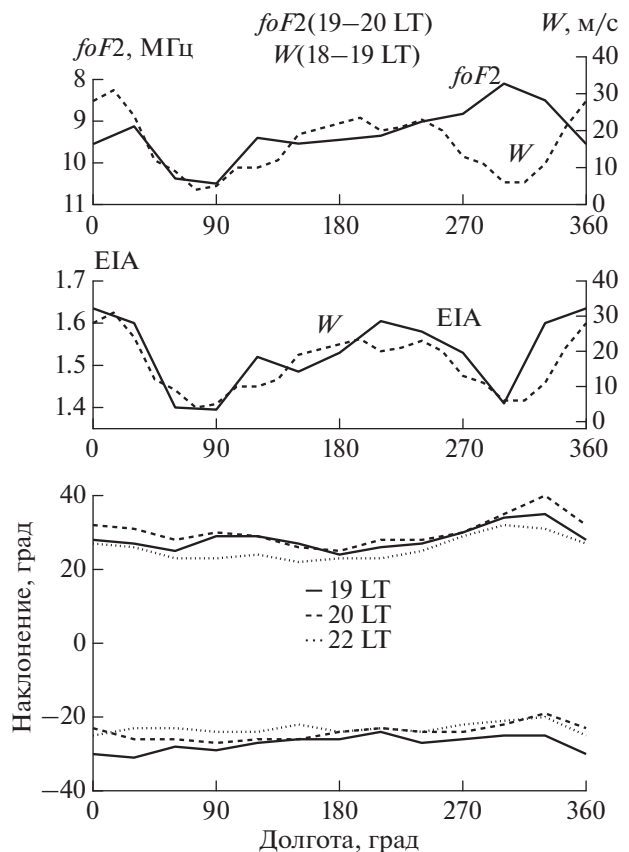


Рис. 6. Долготные вариации  $foF2$  и  $W$  (вверху), EAI и  $W$  (в середине) и положения гребней для разных часов местного времени (внизу).

блюдаются минимальные значения  $foF2$  на всех широтах. Следовательно, они определяются каким-то другим механизмом, скорее всего действием нейтрального ветра и состава термосферы, т.е. уменьшением  $O/N_2$ . Но для ответа на этот вопрос требуются расчеты.

### 5. РАСПАД ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ АНОМАЛИИ

Рассмотрим динамику ЭА в период ее распада. На рисунке 8 приведены распределения  $foF2$  для 00, 02 и 04 LT, а на рис. 9 – широтные вариации  $foF2$  для этих часов местного времени в долготных секторах 90°, 180° и 300°. Долготный сектор 180° приведен, поскольку во время распада ЭА он снова является специфическим. После вечернего всплеска вертикального дрейфа и, связанной с ним интенсификации ЭА, она начинает распадаться, сначала медленно, так что даже в полночь аномалия еще довольно хорошо развита – рис. 8 и рис. 9. Это резко контрастирует с поведением ЭА при низкой активности, когда она практически исчезает уже к 18–19 LT. Это наглядно показано в работах [Ram et al., 2009; Liu et al., 2007; Xiong et al., 2013]. Распад ЭА четко прослеживается на рис. 9

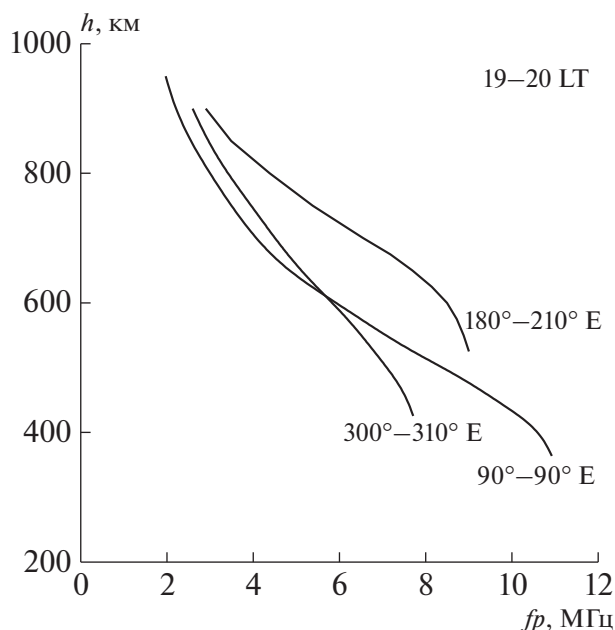


Рис. 7.  $N(h)$ -профили верхней ионосферы для 19–20 LT в характерных долготных секторах.

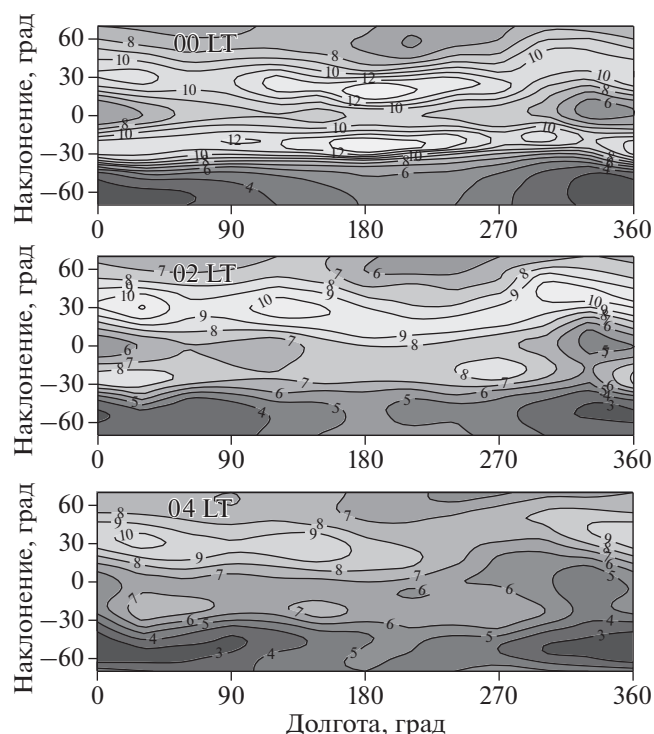


Рис. 8. Распределение  $foF2$  для 00, 02 и 04 LT.

при сравнении с отсчетным широтным профилем для 22 LT. После 22 LT гребни ЭА сдвигаются к экватору и уменьшаются по величине, что особенно ярко проявилось на долготах  $90^\circ$  и  $300^\circ$ . В долготном секторе  $180^\circ$  гребни продолжают

движение к экватору и после полуночи, и только тогда резко уменьшаются по величине. А в долготных секторах  $90^\circ$  и  $300^\circ$  гребни с полуночи и до 02 LT, наоборот, отходят от экватора. На долготах Америки это движение продолжается и далее, так что в 04 LT максимум  $foF2$  в южном полушарии оказывается на широте  $\sim 33^\circ I$ , а в северном полушарии вообще практически на средних широтах  $\sim 50^\circ I$ . Это слишком далеко для нормального гребня ЭА, созданного фонтан-эффектом. В долготном секторе  $180^\circ$  оба гребня в 04 LT также находятся дальше от экватора, чем в 02 LT, а в долготном секторе  $90^\circ$  – немного ближе. После полуночи южный гребень распадается гораздо быстрее северного, т.е. наблюдается асимметрия ЭА, обратная той, которая наблюдалась при развитии ЭА. В 04 LT южный гребень очень небольшой по величине, гораздо меньше северного гребня (максимума). Это хорошо известный факт (см., например, [Rao and Jogulu, 1979; Zhao et al., 2009]). Утверждается также, что ЭА дольше существует в Американском секторе [Walker, 1981]. Однако, рассматривая рисунки 8 и 9, такой вывод сделать трудно, если конечно не учитывать тот факт, что в 04 LT в долготном секторе  $330^\circ$  южного гребня нет. Но это уже долготы Атлантики.

Вариации положения гребней ЭА в период ее распада приведены на рис. 10. К полуночи гребни уже немного сдвинулись к экватору по сравнению с максимумом развития в 20–22 LT. Положение южного гребня в это время отличается от положения в 02 и 04 LT всего на  $2^\circ$ – $3^\circ$ , что, в общем, лежит в пределах точности его определения. А вот далее поведение южного гребня четко зависит от долготы. В восточном полушарии в 02 LT оказывается дальше от экватора, чем в 04 LT, а в западном полушарии наоборот – ближе к экватору. Положение гребней зависит от действия нейтрального ветра, что особенно актуально при ослабленном фонтан-эффекте. Тогда можно предположить, что в восточном полушарии ночной ветер к экватору был сильнее в 02 LT, чем в 04 LT, а в западном – наоборот. Проверить это трудно, потому что модель нейтрального ветра NWM воспроизводит скорость ветра в южном полушарии с большими ошибками (см., например, [Karpachev and Gasilov, 2001]).

Северный гребень претерпевает гораздо более сильные вариации с долготой. В 02 LT только в долготном секторе  $180^\circ$ – $270^\circ$  северный гребень, как и южный, оказывается ближе к экватору, чем в полночь, т.е. ЭА наиболее слабо развита в этих условиях. На остальных долготах северный гребень после полуночи отходит от экватора. На долготах  $270^\circ$ – $300^\circ$  максимум  $foF2$  в 04 LT оказывается на широте  $52^\circ I$ . Насколько этот максимум связан с “нормальным” гребнем ЭА, вопрос открытый. Поэтому он отображен на рис. 10 в качестве гребня ЭА чисто формально. Отметим, что



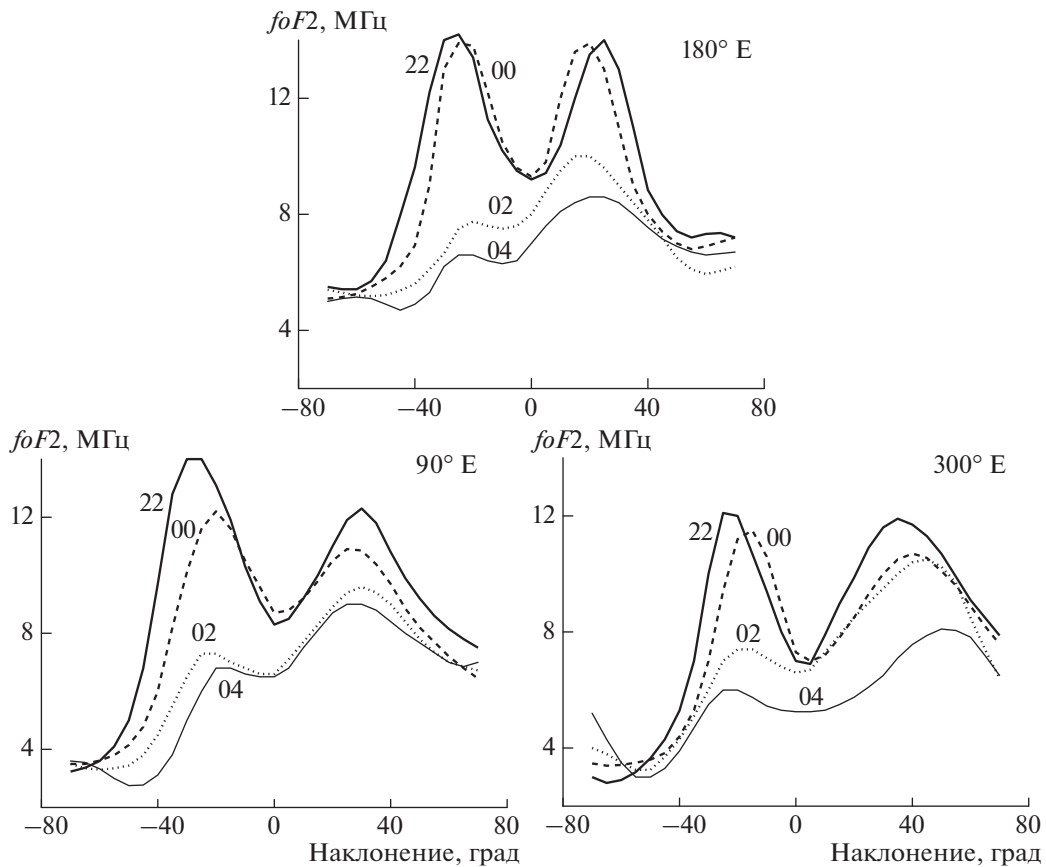


Рис. 9. Широтные вариации  $foF2$  для 22, 00, 02 и 04 LT в характерных долготных секторах  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  и  $300^\circ$ .

долготные вариации положения гребня в северном полушарии по форме подобны долготным вариациям  $foF2$  в ночной среднеширотной ионосфере (см., например, [Klimenko et al., 2016]). Сказанное относится к обоим гребням, что еще раз свидетельствует в пользу нейтрального ветра, скорее чем электрического поля, создающего ЭА.

ются оба гребня ЭА. Ясно, что все это происходит после изменения направления скорости вертикального дрейфа плазмы вверх. На долготах западного полушария (штриховая кривая для  $270^\circ$ – $300^\circ$ ) величина EAI практически монотонно растет до 17 LT, показывая небольшой максимум в 14 LT. Этот максимум выражен гораздо более чет-

### 6. СУТОЧНЫЕ ВАРИАЦИИ ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ АНОМАЛИИ

Рассмотрим кратко суточные вариации характеристик ЭА, поскольку они, в общем, уже рассматривались по ходу изложения. На рисунке 11а приведены суточные вариации степени развития ЭА. Они были получены усреднением данных отдельно для долгот  $90^\circ$ – $120^\circ$  и  $270^\circ$ – $300^\circ$ . Там же (рис. 11б) приведены вариации вертикального дрейфа плазмы, выделенные для летних условий по данным ROCSAT-1 [Fejer et al., 2008]. ЭА начинает формироваться с 08 LT с появлением южного гребня – рис. 11г. Он до 14 LT преобладает над северным, поэтому степень развития ЭА (EAI) рассчитывалась в этот период как отношение  $foF2$  в максимуме южного гребня к  $foF2$  в экваториальной впадине. ЭА развивается и в 10 LT формиру-

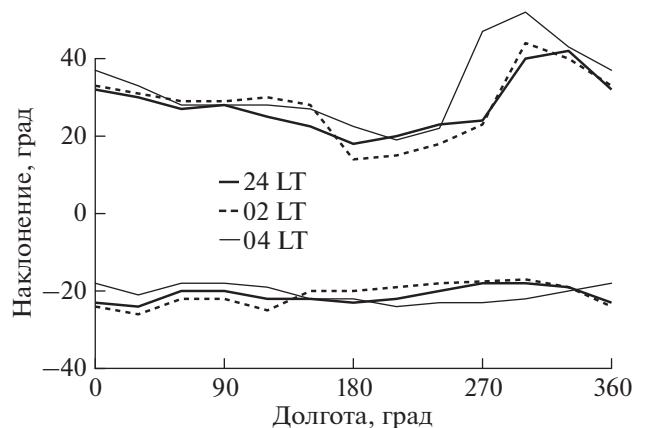
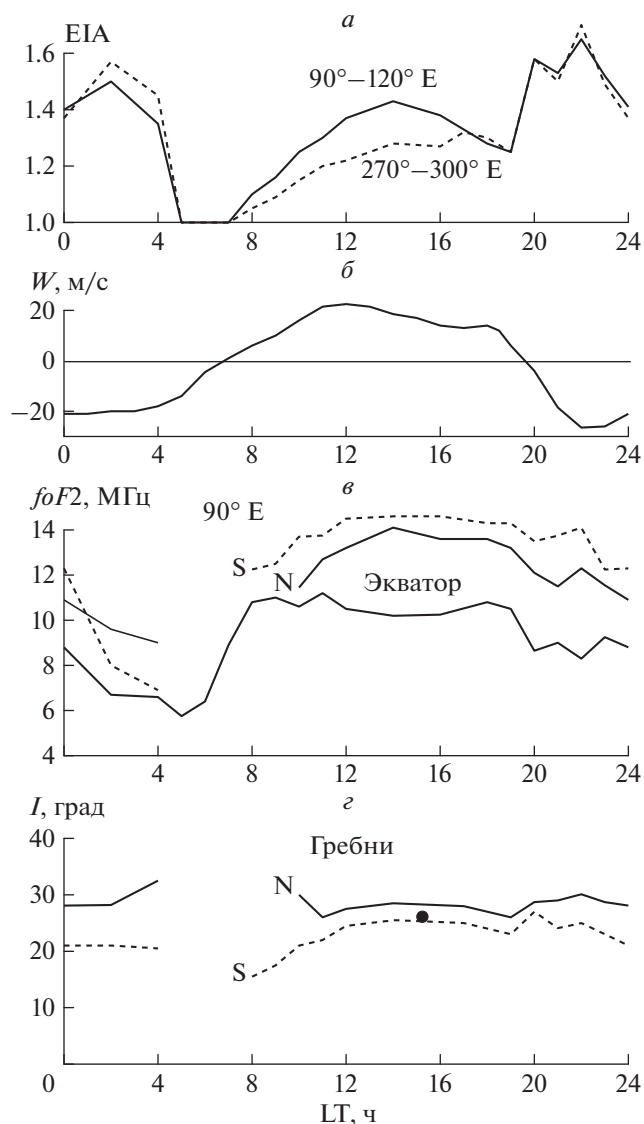


Рис. 10. Долготные вариации положения гребней ЭА для 00, 02 и 04 LT.



**Рис. 11.** Сверху вниз: суточные вариации степени развития ЭА (EAI) в долготных секторах  $90^{\circ}$ – $120^{\circ}$  E и  $270^{\circ}$ – $300^{\circ}$  E, скорости вертикального дрейфа  $W$  [Fejer et al., 2008], величины  $foF2$  в гребнях и над экватором, положения гребней. Кружок – положение северного гребня на долготе  $121^{\circ}$  [Huang, 1996].

ко на долготах восточного полушария ( $90^{\circ}$ – $120^{\circ}$ ). Он, безусловно, связан (с вполне объяснимой задержкой) с локальным максимумом скорости дрейфа плазмы в 10–11 LT. Этот максимум был зафиксирован ранее, по данным спутника ISS-b за август–декабрь 1979 г. [Matuura, 1981], причем наиболее сильно этот максимум проявился именно в секторе  $90^{\circ}$ – $120^{\circ}$ . Полуденный максимум EAI связан с полуденным уменьшением  $foF2$  (рис. 11в), которое наблюдается в виде так называемого выкуса (bite-out) как раз на долготах Индии [Rao, 1963]. В Американском долготном секторе следующий локальный максимум наблюдается в 17 LT.

Его наличие первоначально вызвало сомнения, поэтому данные для этого сектора были тщательно перепроверены. Кроме того, выяснилось, что этот максимум наблюдался и по наземным данным, полученным для меридиана  $75^{\circ}$  W в июне при высокой солнечной активности [Rush et al., 1969]. Таким образом, факт подтвердился, остается понять, с чем он связан. Вариации положения гребней ЭА на рис. 11г были получены усреднением данных для всех долгот. Видно, что южный гребень появляется на широте  $16^{\circ}$  I и по мере развития ЭА отходит от экватора до  $28.5^{\circ}$  I к 14 LT. Северный гребень весь день находится на несколько градусов дальше от экватора. Но стартует он с чересчур большой широты  $30^{\circ}$  I, поскольку, как было показано выше, формируется на фоне низкоширотного максимума  $foF2$ . Можно предположить, что  $30^{\circ}$  I – это некая совместная широта для пика, связанного с нейтральным ветром и для гребня аномалии, созданного фонтан-эффектом. Северный гребень также максимально удален от экватора в 14 LT. Итак, северный гребень все время находится дальше от экватора, т.е. имеет место умеренная асимметрия ЭА, которая увеличивается от 20 LT к 04 LT. Практически такая же асимметрия наблюдалась и по данным спутника CHAMP для июньского солнцестояния при высокой солнечной активности [Xiong et al., 2013]. Кружком на рис. 11г отмечено положение северного гребня, полученное усреднением данных по ТЕС, полученных на обсерватории Lunping ( $25^{\circ}$  N,  $121^{\circ}$  E) для высокой солнечной активности [Huang and Cheng, 1996]. Согласие с усредненным для всех долгот северным гребнем хорошее. При этом утверждается, что летом положение северного гребня не зависит от солнечной активности. Однако представляется, что вопрос зависимости положения гребней ЭА от долготы, сезона и солнечной активности должен быть рассмотрен более глубоко.

Из рисунка 11в видно также, что по мере развития ЭА  $foF2$  в обоих гребнях увеличивается (до ~14 МГц), а над экватором уменьшается. После 14 LT наблюдается обратный процесс – ЭА немного ослабляется и к 19 LT достигает локального минимума. Выше было показано, что электронная концентрация в гребнях уменьшается к 18–19 LT, а над экватором почти не изменяется, поэтому степень развития ЭА уменьшается по сравнению с дневными часами. Это явно связано с локальным минимумом  $W$  в 17 LT. Затем степень развития ЭА на всех долготах быстро достигает максимума EAI = 1.58 в 20 LT, т.е. с задержкой 1.5–2.0 ч после вечернего всплеска скорости вертикального дрейфа плазмы. Более точно установить эту задержку данные ИК-19 не позволяют. Затем EAI несколько падает, после чего достигает абсолютного максимума 1.65 в 22 LT. (Как было показано выше, эти значения немного больше на

долготе 180°). Этот максимум связан уже с действием дрейфа, направленного вниз – рис. 11б. Дрейф, направленный вниз, сгоняет плазму вдоль магнитных силовых линий опять же на широтах гребней, а над экватором электронная концентрация продолжает падать к утру [Balan and Baily, 1995]. Гребни ЭА наиболее далеко уходят от экватора в 20–22 LT, общая ширина ЭА достигает 56° I. После 22 LT степень развития ЭА падает к утренним часам, показывая еще один локальный максимум в 02 LT. Отметим, что поскольку на фазе распада ЭА наибольшим является северный гребень аномалии, степень развития ЭА рассчитывалась в это время по нему. Среднее положение южного гребня после полуночи практически не изменяется, а северный гребень отходит от экватора. Однако, как было показано выше, поведение гребней очень сильно зависит от долготы. В Азиатском секторе северный гребень все время после полуночи, а южный в 02 LT находится дальше от экватора, чем в полночь. Уход гребней от экватора согласуется с наземными наблюдениями, сделанными в Азиатском секторе в работе [Walker et al., 1994]. Авторы утверждали, что при высокой солнечной активности в любой сезон имеет место возрождение (resurgence) гребней ЭА около 03 LT. По мнению авторов оно связано с известным послеполуночным увеличением электронной концентрации на средних широтах, которая затем переносится к экватору нейтральным ветром (см., например, [Farelo et al., 2002]). В Американском долготном секторе оба гребня в 04 LT находятся гораздо дальше от экватора, чем в полночь, т.е. также наблюдается усиление ЭА. И это согласуется с выводами, сделанными в работе [Yizengaw et al., 2009], в которой по данным TЕС TOPEX на долготе 80° W 27 апреля 2003 г. наблюдался максимум ЭА в 20 LT, потом минимум в 23:30 LT, а затем опять хорошо развитая ЭА вплоть до 04 LT. Усиление ЭА в 02–03 LT было обнаружено и при статистическом анализе ЭА по данным COSMIC для низкой солнечной активности [Yue et al., 2015]. Таким образом, это довольно четко установленная особенность динамики ЭА. Однако, как было показано выше, максимумы электронной концентрации на широтах гребней в 02–04 LT, по крайней мере на долготах Америки, связаны, скорее, с действием нейтрального ветра, а не электрического поля, формирующего ЭА. Поэтому, делая вывод о возрождении ЭА, следует иметь это в виду.

## 7. ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, впервые построена детальная картина вариаций  $foF2$  в области ЭА для летнего солнцестояния для высокой солнечной активности. Это удалось сделать только благодаря уникальным данным спутника Интеркосмос-19, который поз-

волил получить глобальный массив данных по электронной концентрации во внешней ионосфере, включая значения  $foF2$  и  $hmF2$ . Полученная картина является наиболее полной, поскольку описывает практически все проявления ЭА для летних условий, включая суточные и долготные вариации степени развития ЭА и положения ее гребней. Построенная картина хорошо согласуется с полученными ранее отдельными результатами. В частности, давно было установлено, что при высокой солнечной активности ЭА начинает формироваться с 08–09 LT и еще в полночь она достаточно хорошо развита, в отличие от низкой солнечной активности, когда она распадается уже к 19–20 LT. Сначала формируется зимний, южный гребень ЭА. Развитие ЭА четко связано со сменой направления электрического поля к востоку, после чего вертикальный дрейф плазмы  $W$  направлен вверх, и начинает действовать фонтан-эффект. Северный летний гребень появляется только к ~10 LT и долго отстает в развитии, так что даже в 14 LT он немного меньше зимнего. В период распада, наоборот, северный гребень существует дольше южного, вплоть до 04 LT. Такое поведение гребней также хорошо известно и присуще и высокой, и низкой солнечной активности. Наиболее наглядно это продемонстрировано по данным COSMIC для низкой и средней активности [Luan et al., 2015] и по данным TЕС для высокой солнечной активности [Zhao et al., 2009]. Данные ИК-19 показывают, что более сложная динамика северного гребня связана с тем, что он формируется на фоне низкоширотного максимума  $foF2$ . Этот максимум легко спутать с гребнем, чем, вероятно, объясняются расхождения в положении северного гребня по разным данным. Данные ИК-19 подтверждают наличие более ярко выраженного локального максимума в развитии ЭА (EAI) в 14 LT в восточном полушарии, по сравнению с западным. С другой стороны, в западном полушарии был выделен слабый локальный максимум в EAI в 17 LT, не обнаруженный в восточном. ЭА наиболее слабо выражена в 19 LT, что связано с локальным минимумом в  $W$ . После чего степень развития быстро растет. Обычно считается, что максимального развития ЭА достигает в 20 LT. Это гораздо позже, чем при низкой солнечной активности (в 16–17 LT), что четко показано в работе [Ram et al., 2009]. Однако данные ИК-19 показывают двойной максимум – в 20 и 22 LT. Первый безусловно связан с вечерним всплеском скорости вертикального дрейфа плазмы, а, второй, очевидно с переверотом скорости дрейфа вниз, после чего также происходит усиление ЭА. Средняя ширина ЭА в 20–22 LT достигает максимума 56° I. В литературе долгое время обсуждался вопрос, в каком долготном секторе ЭА более развита – Азиатском или Американском. Данные ИК-19 позволяют ответить и на

этот вопрос: в период развития ЭА она наиболее сильно развита в Азиатском секторе, несколько менее в Американском и наиболее слабо на долготях  $180^{\circ}$ – $210^{\circ}$ . В это время в долготных вариациях параметров ЭА наблюдается сильная 4 гармоника. Вечером наоборот, ЭА наиболее сильно развита на долготах  $180^{\circ}$ – $210^{\circ}$ , а наименее – в Азиатском и Американском секторах. Во время распада ЭА в 02–04 LT зависимость от долготы четко не проявилась, т.е. нельзя утверждать, как это часто делается, что ЭА дольше существует в Американском секторе. Вариации EAI происходят по обычной схеме, при усилении аномалии электронная концентрация над экватором уменьшается, в максимумах гребней увеличивается, и они отходят от экватора. Положение гребней, особенно зимнего, сильно зависит от долготы – до  $15^{\circ}$  I. Это предполагает и сильную асимметрию ЭА. Однако в среднем, северный гребень днем находится всего на  $3^{\circ}$ – $4^{\circ}$  I дальше от экватора, чем южный. Это расстояние сильно увеличивается после полуночи, но в это время, очевидно, эффект нейтрального ветра преобладает над фонтан-эффектом.

Характеристики ЭА сильно отличаются при низкой и высокой солнечной активности. В последние годы для низкой солнечной активности был получен огромный массив данных по ТЕС и радиозатменным наблюдениям, по которым, очевидно, также можно создать полную картину вариаций характеристик ЭА. Сравнение картины ЭА при высокой и низкой солнечной активности в свою очередь позволит гораздо глубже понять механизм формирования ЭА. Пока такой возможности нет, сравнение можно проводить по отдельным аспектам этой картины. Что и было частично сделано в данной работе.

Построение полной, детальной картины динамики ЭА не означает, что не осталось неясных вопросов. Отметим наиболее очевидные. Например, считается, что ЭА полностью отсутствует в период 05–07 LT. Однако данные ИК-19 иногда показывают наличие небольших гребней даже в 06 LT. Северный гребень формируется на фоне низкоширотного максимума электронной концентрации, поэтому мы, скорее всего, наблюдаем их совместную динамику, что в особенности относится к периоду распада ЭА, когда максимум  $foF_2$  в северном полушарии находится на чересчур большой широте  $52^{\circ}$  I. Геомагнитный экватор находится далеко к югу от географического в Американском долготном секторе, вероятно, поэтому поведение ЭА здесь, как было показано выше, очень сложное. Все эти вопросы требуют дальнейших исследований.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках Программы Президиума РАН № 28.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Karpachev A.T.* Характеристики глобального долготного эффекта в ночной экваториальной аномалии // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 28. № 1. С. 46–49. 1988.
- *Karpachev A.T.* Суточные и долготные вариации структуры экваториальной аномалии в периоды равноденствий по данным ИСЗ “Интеркосмос-19” // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 58. № 3. С. 423–433. 2018.
- *Appleton E.V.* Two anomalies in the ionosphere // Nature. V. 157. P. 691. 1946.
- *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. <https://doi.org/10.1029/95JA01555>
- *Chen Y., Liu L., Le H., Wan W., Zhang H.* Equatorial ionization anomaly in the low-latitude topside ionosphere: Local time evolution and longitudinal difference // J. Geophys. Res. V. 121. P. 7166–7182, 2016. <https://doi.org/10.1002/2016JA022394>
- *Eccles D., King J.W.* A review of topside sounder studies of the equatorial ionosphere // Proc. IEEE. V. 57. № 6. P. 1012–1018. 1969.
- *Farelo A.F., Herraiz M., Mikhailov A.* Global morphology of night-time NmF2 enhancements // Ann. Geophysicae. V. 20. № 11. P. 1795–1806. 2002.
- *Fejer B.G., Jensen J.W., Su S.-Y.* Quiet time equatorial F region vertical plasma drift model derived from ROCSAT-1 observations // J. Geophys. Res. V. 113. A05304. 2008. <https://doi.org/10.1029/2007JA012801>
- *Hopkins H.D.* Longitudinal variation of the equatorial anomaly // Planet. Space Sci. V. 20. № 12. P. 2093–2098. 1972.
- *Huang Y.-N., Cheng K.* Solar cycle variations of the equatorial ionospheric anomaly in total electron content in the Asian region // J. Geophys. Res. V. 101. № 11. P. 24513–24520. 1996.
- *Karpachev A.T., Gasilov N.A.* Zonal and meridional wind components derived from Intercosmos-19 hmF2 measurements // Adv. Space Res. V. 27. № 6/7. P. 1245–1252. 2001.
- *King J.W., Olatunji E.O., Eccles D., Newman W.S.* The integrated electron content in the equatorial ionosphere // J. Atmos. Terr. Phys. V. 29. № 11. P. 1391–1396. 1967.
- *Klimenko V.V., Karpachev A.T., Klimenko M.V., Ratovskii K.G., Korenkova N.A.* Latitudinal structure of the longitudinal effect in the nighttime ionosphere during the summer and winter solstice // Russ. J. Phys. Chem. B. V. 10. № 1. P. 91–99. 2016.
- *Lei J., Thayer J.P., Forbes J.M.* Longitudinal and geomagnetic activity modulation of the equatorial thermosphere anomaly // J. Geophys. Res. V. 115. A08311. 2010. <https://doi.org/10.1029/2009JA015177>
- *Liu H., Stolle C., Forster M., Watanabe S.* Solar activity dependence of the electron density at 400 km at equatorial and low latitudes observed by CHAMP // J. Geophys. Res.

- V. 112. A11311. 2007.  
<https://doi.org/10.1029/2007JA012616>
- Liu H., Watanabe S. Seasonal variation of the longitudinal structure of the equatorial ionosphere: Does it reflect tidal influences from below? // *J. Geophys. Res.* V. 113. A08315. 2008.  
<https://doi.org/10.1029/2008JA013027>
- Lockwood G.E.K., Nelms G.L. Topside sounder observations of the equatorial anomaly in the 75° W longitude zone // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 26. № 5. P. 569–580. 1964.
- Luan X., Wang P., Dou X., Liu Y.C.-M. Interhemispheric asymmetry of the equatorial ionization anomaly in solstices observed by COSMIC during 2007–2012 // *J. Geophys. Res.* V. 120. P. 3059–3073, 2015.  
<https://doi.org/10.1002/2014JA020820>
- Lyon A.J., Thomas L. The F2-region equatorial anomaly in the African, American and East Asian sectors during sunspot minimum // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 25. № 7. P. 373–386. 1963.
- Matuura N. Characteristics of global distribution of foF2 // *Sol. Terr. Environ. Res. Japan.* V. 5. P. 35–38. 1981.
- Moffet R. The equatorial anomaly in the electron distribution of the terrestrial R-region // *Fundamentals of Cosmic Physics.* V. 4. P. 313–391. 1979.
- Pancheva D., Mukhtarov P. Global response of the ionosphere to atmospheric tides forced from below: Recent progress based on satellite measurements global tidal response of the ionosphere // *Space Sci. Rev.* V. 168. № 1–4. P. 175–209. 2012.
- Rajaram G. Structure of the equatorial F-region, topside and bottomside – a review // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 39. № 9. P. 1125–1144. 1977.
- Ram S.T., Su S.-Y., Liu C.H. FORMOSAT-3/COSMIC observations of seasonal and longitudinal variations of equatorial ionization anomaly and its interhemispheric asymmetry during the solar minimum period // *J. Geophys. Res.* V. 114. A06311. 2009.  
<https://doi.org/10.1029/2008JA013880>
- Rao B.C.N. Some characteristic features of the equatorial ionosphere and the location of the F-region equator // *J. Geophys. Res.* V. 68. № 9. P. 2541–2549. 1963.
- Rao C.S.R., Malthotra P.L. A study of geomagnetic anomaly during I.G.Y. // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 26. № 11. P. 1075–1085. 1964.
- Rao M.P., Jogulu C. Diurnal development of the equatorial anomaly in the topside ionosphere // *Indian J. Radio Space.* V. 8. P. 310–317. 1979.
- Rishbeth H. The equatorial F-layer: progress and puzzles // *Ann. Geophysicae.* V. 18. № 7. P. 730–739. 2000.
- Rush C.M., Rush S.V., Lyons L.R., Venkateswaran S.V. Equatorial anomaly during a period of declining solar activity // *Radio Sci.* V. 4. № 9. P. 829–841. 1969.
- Sastri J.H. Equatorial anomaly in F-region – a review // *Indian J. Radio Space Phys.* V. 19. № 4. P. 225–240. 1990.
- Sharma R.P., Hewens E.J. A study of the equatorial anomaly at American longitudes during sunspot minimum // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 38. № 5. P. 475–484. 1976.
- Thomas L. The F2-region equatorial anomaly during solstice periods at sunspot maximum // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 30. P. 1631–1640. 1968.
- Walker G.O., Chan C.S. The diurnal variation of the equatorial anomaly in the topside ionosphere at sunspot maximum // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 38. № 7. P. 699–706. 1976.
- Walker G.O. Longitudinal structure of the F-region equatorial anomaly – a review // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 43. № 8. P. 763–774. 1981.
- Walker G.O., Ma J.H.K., Golton E. The equatorial ionospheric anomaly in electron content from solar minimum to solar maximum for South East Asia // *Ann. Geophysicae.* V. 12. № 2/3. P. 195–209. 1994.
- Xiong C., Lüher H., Ma S.Y. The magnitude and interhemispheric asymmetry of equatorial ionization anomaly-based on CHAMP and GRACE observations // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, V. 105. P. 160–169. 2013.  
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2013.09.010>
- Yizengaw E., Moldwin M.B., Sahai Y., Rodolfo J. Strong postmidnight equatorial ionospheric anomaly observations during magnetically quiet periods // *J. Geophys. Res.* V. 114. A12308. 2009.  
<https://doi.org/10.1029/2009JA014603>
- Yue X., Schreiner W.S., Kuo Y.-H., Lei J. Ionosphere equatorial ionization anomaly observed by GPS radio occultations during 2006–2014 // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 129. № 7. P. 30–40. 2015.
- Zeng Z., Burns A., Wang W., Lei J., Solomon S., Syndergaard S., Qian L., Kuo Y.-H. Ionospheric annual asymmetry observed by the COSMIC radio occultation measurements and simulated by the TIEGCM // *J. Geophys. Res.* V. 113. A07305. 2007.  
<https://doi.org/10.1029/2007JA012897>
- Zhao B., Wan W., Liu L., Ren Z. Characteristics of the ionospheric total electron content of the equatorial ionization anomaly in the Asian-Australian region during 1996–2004 // *Ann. Geophysicae.* V. 27. № 10. P. 3861–3873. 2009.