

## МОДЕЛЬ ЗИМНЕГО НОЧНОГО ГЛАВНОГО ИОНОСФЕРНОГО ПРОВАЛА ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ УРОВНЕЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

А.Т. Карпачев<sup>1</sup>, В.В. Клименко<sup>2</sup>, М.В. Клименко<sup>2</sup>, Л.В. Пустовалова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИЗМИРАН им. Н.В. Пушкова, Москва, Россия, e-mail: karp@izmiran.ru

<sup>2</sup>Западное отделение ИЗМИРАН им. Н.В. Пушкова, Калининград, Россия, e-mail: maksim.klimenko@mail.ru

**Аннотация.** Представлено описание эмпирической модели зимнего ночного главного ионосферного провала, разработанной в ИЗМИРАН. Приведены различные распределения основных выходных параметров модели, которые могут быть получены при использовании интернет ресурса, расположенного на Web-сайте ИЗМИРАН.

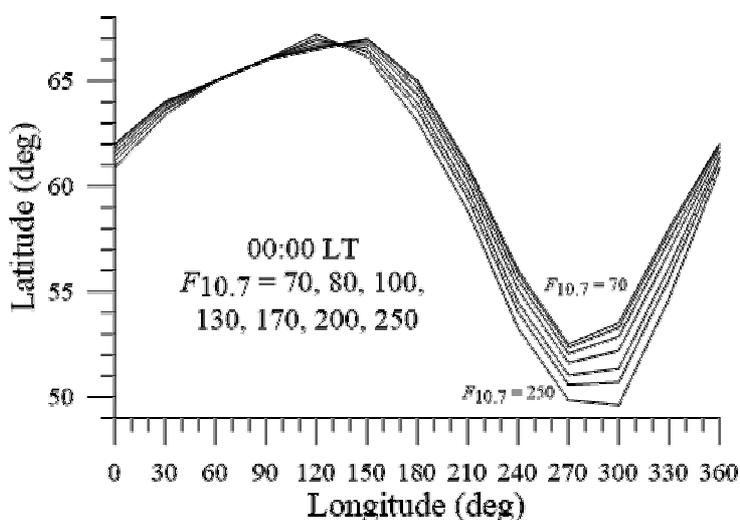
### Введение

Под главным ионосферным провалом (ГИП) обычно понимают структуру, в которой электронная концентрация ионосферной плазмы  $N_e$  значительно падает в относительно узком интервале субавроральных широт вблизи экваториальной границы аврорального овала. Конфигурация ГИП (форма и локализация) является предметом интенсивных исследований. Это обусловлено тем, что ГИП существенно влияет на надежность радиосвязи на радиотрассах, проходящих через субавроральные широты, а именно, появление ГИП является одной из основных причин срыва радиосвязи на таких трассах (смотри, например, (Благовещенский и Жеребцов, 1987)). До настоящего времени были построены несколько эмпирических моделей положения минимума ГИП (смотри, например, (Kohnlein and Raitt, 1977; Karpachev et al., 1996; Werner and Prohls, 1997)). Однако, полной модели ГИП, которая бы учитывала не только положение, но и форму провала, до сих пор все еще не существует, хотя попытки построить такую модель предпринимались неоднократно (смотри, например, (Halcrow and Nisbeth, 1977; Feichter and Leitinger, 2002)). В международной справочной модели ионосферы IRI структура ГИП специально не выделена и только в одной из эмпирических моделей, а именно, модели СМИ (Часовитин и др., 1988), приближенно отражена конфигурация ГИП. В данной работе представлено описание представляемой медианной модели положения и формы зимнего ночного главного ионосферного провала для северного полушария, которая может быть использована для долгосрочного прогноза субавроральной ионосферы, а также основные результаты, полученные с помощью этой модели. Модель размещена на Web-сайте ИЗМИРАН <http://www.izmiran.ru/ionosphere/sm-mit/>.

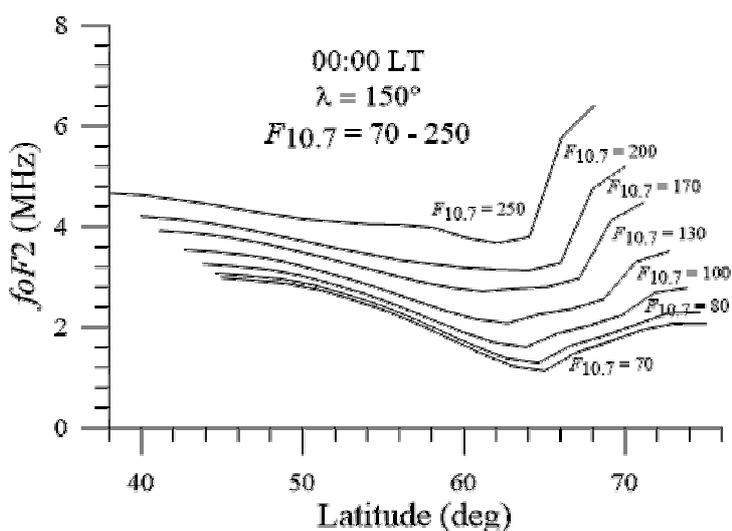
### Описание модели ГИП

Модель главного ионосферного провала создавалась в два этапа – вначале была построена модель положения минимума провала, а затем, с учетом этого положения, строилось пространственное распределение  $foF_2$  в области ГИП. Необходимость такого подхода диктуется сильной зависимостью положения минимума провала от местного времени и долготы. Для построения модели ионосферного провала использовались данные спутников «Космос-900», «Интеркосмос-19» и СНАМР. Для минимума солнечной активности (2004–2009 гг.,  $F_{10.7} < 100$ ) использовались прямые зондовые измерения  $N_e$  на низкоорбитальном спутнике СНАМР (~ 8000 витков). Данные измерений на высоте спутника СНАМР приводились к высоте максимума слоя  $F_2$ . Для этого использовалась модель IRI. Поскольку высоты спутника 418–474 км в ночных условиях находятся не намного выше высоты максимума слоя  $F_2$  (360–420 км), ошибки коррекции не должны быть большими. Действительно, сравнение исходных и приведенных к высоте максимума слоя  $F_2$  широтных разрезов в области провала показало лишь незначительные различия в форме провала, в то время как положение провала вообще не изменялось вследствие коррекции. Умеренная солнечная активность (1978–1979 гг.) в модели представлена данными прямых измерений  $N_e$  с низкоорбитального спутника «Космос-900» (около 2500 витков). «Космос-900» обращался по практически круговой орбите, высота которой с течением времени уменьшилась от 550 км до 350 км. Поскольку эти высоты незначительно превышают высоту максимума слоя  $F_2$  и положение провала практически не изменяется с высотой, данные «Космос-900» были использованы для построения модели положения минимума ночного ГИП. Для периода высокой солнечной активности (1979–1981 гг.,  $F_{10.7} = 150–250$ ) использовались данные внешнего зондирования со спутника «Интеркосмос-19» (свыше 1000 пролетов в высокоширотной ночной ионосфере, во время которых было получено около 10000 ионограмм внешнего зондирования для ночных часов местного времени). Полученная аналитическая зависимость положения минимума ночного ГИП от местного времени и долготы описывает его более точно по сравнению с другими моделями. Положение минимума ночного провала задается в модели по формуле:  $\Phi(t, \lambda) = 60^\circ - 0.7(t - 0.1t^2 - 0.01t^3) + 1.2 \cos(\lambda + 40^\circ) - 1.1 \cos(2\lambda - 39^\circ)$ , в которой учитывается за-

висимость от местного времени  $t$  и долготы  $\lambda$ . Здесь  $\Phi$  – исправленная геомагнитная широта,  $t$  (LT) – местное время, которое отсчитывается от полуночи. Модель формы ГИП представлена в виде набора таблиц отношения  $foF2/foF2_{\min}$  в интервале широт  $45^\circ-75^\circ$  для 24 долгот и 24 моментов времени UT для максимума и минимума солнечной активности с линейной интерполяцией для промежуточных уровней солнечной активности. Для получения абсолютных значений  $foF2$  в области ГИП производилась нормировка модельных отношений либо по данным наблюдений  $foF2$ , либо с использованием модельных значений  $foF2$  в окрестностях экваториальной и полярной стенок ГИП, что удобно с практической точки зрения. В рассматриваемом нами случае наиболее естественным представляется использование модели среднемесячных медианных значений  $foF2$ . На данном этапе в качестве таковых были выбраны данные глобальной эмпирической модели CCIR, являющейся составной частью Международной Справочной Модели Ионосферы IRI. Модель главного ионосферного провала применима для ночных зимних условий на всех долготах северного полушария в интервале местного времени 18:00–06:00 LT при любом уровне солнечной активности. Летом ГИП даже ночью наблюдается редко, поэтому его влияние на субавроральную ионосферу в этих условиях не учитывается. Модель описывает среднемесячное климатологическое состояние субавроральной ионосферы для спокойных геомагнитных условий с  $K_p = 2$ . Модель оформлена в виде отдельного программного блока, предназначенного для последующего включения его в системы долгосрочного и краткосрочного прогнозирования.



**Рисунок 1.** Положение минимума ГИП в северном полушарии в географической системе координат в полночь по местному времени (00:00 LT) для различных уровней солнечной активности



**Рисунок 2.** Широтные вариации  $foF2$  в северном полушарии на долготу  $\lambda = 150^\circ\text{E}$  в полночь по местному времени (00:00 LT) для различных уровней солнечной активности

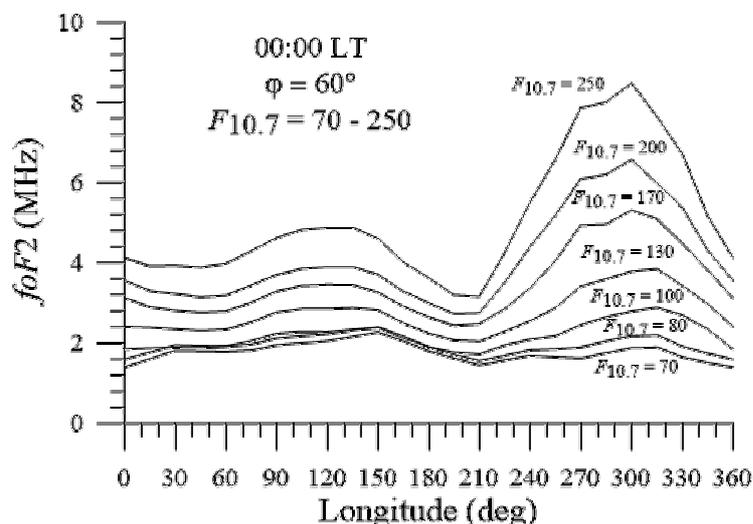
### Результаты работы модели ГИП

Входными параметрами модели являются мировое время и индекс солнечной активности. При заданном уровне солнечной активности (12-ти месячное сглаженное число солнечных пятен Rz12) и моменте мирового времени (UT) модель рассчитывает распределение  $foF2$  для северного полушария в виде массива ( $\lambda, \phi, foF2$ ) с шагом  $15^\circ$  по долготе. Такой массив может быть использован для построения карт и графиков с помощью любой стандартной графической программы.

На рис. 1 представлены графики изменения широтного положения дна провала с долготой для полуночных условий при различных уровнях солнечной активности, полученные с использованием разработанной модели ГИП. Чем ближе к экватору расположено дно провала, тем сильнее проявляется зависимость широтного положения провала от солнечной активности. Таким образом, наиболее сильная зависимость положения ГИП от уровня солнечной активности проявляется в американском долготном секторе ( $270^\circ-300^\circ$ ), а наиболее слабая – в Сибирском долготном секторе ( $90^\circ-120^\circ$ ). Причиной этого является расположение северного магнитного полюса относительно географического (геомагнитный полюс смещен в американский долготный сектор).

Наличие сильных долготных вариаций положения минимума провала и значений  $foF2$  в области провала означает то, что широтные вариации  $foF2$ , а, следовательно, и форма провала будут различными в разных долготных секторах (Карпачев, 2003). Поэтому сглаживание широтных вариаций  $foF2$  в каждом интервале местного времени проводилось в

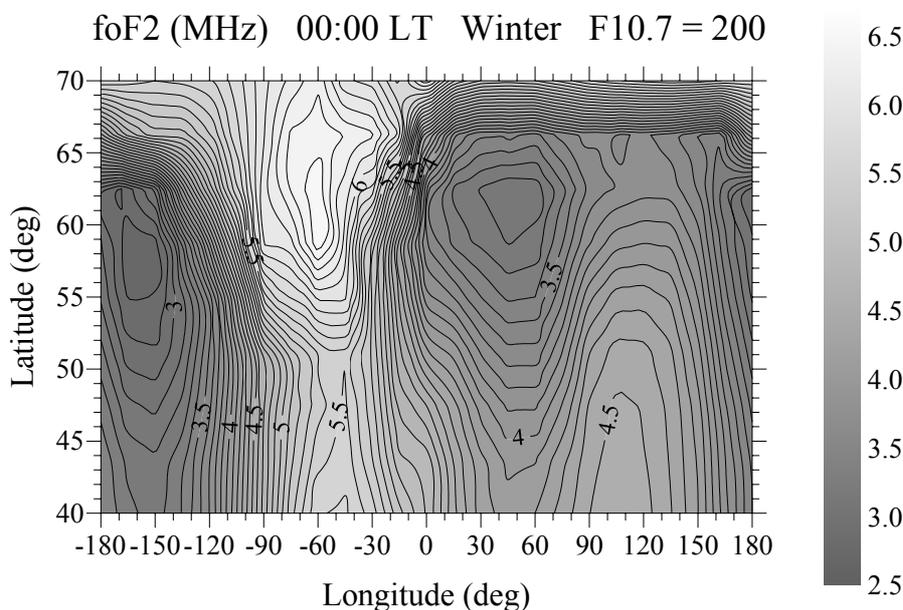
12-ти долготных секторах. Таким образом, при нахождении положения минимума провала учитывались зависимости от  $K_p$ , местного времени LT и долготы  $\lambda$ , а при определении формы провала – зависимости от местного времени LT и долготы  $\lambda$ , и все это фиксировалось для  $K_p = 2$ . На рис. 2 для примера приведены широтные вариации  $foF2$  для различных уровней солнечной активности в долготном секторе  $\lambda = 150^\circ\text{E}$ . Из рис. 2 видно, что: 1) в минимуме солнечной активности значения  $foF2$  в днище ГИП значительно меньше, чем в максимуме активности; 2) экваториальная стенка провала становится более полой при увеличении солнечной активности; 3) полярная стенка провала, наоборот, становится круче с ростом солнечной активности; 4)



**Рисунок 3.** Долготные вариации  $foF2$  в северном полушарии на широте  $\varphi = 60^\circ\text{N}$  в полночь по местному времени (00:00 LT) для различных уровней солнечной активности

глубина провала сложным образом зависит от уровня солнечной активности.

Отметим, что не только положение минимума провала, но и значения  $foF2$  претерпевают сильные вариации с долготой. На рис. 3 приведены долготные вариации  $foF2$  для зимних условий на фиксированной географической широте  $\varphi = 60^\circ\text{N}$  в области провала в полуночном секторе местного времени. Из рис. 3 видно насколько сильно изменяются характер и амплитуда долготного эффекта в зависимости от солнечной активности: с ростом солнечной активности долготные вариации  $foF2$  проявляются ярче. При любом уровне солнечной активности проявляется двухпиковая структура долготных вариаций  $foF2$  с максимумами в американском ( $300^\circ\text{--}330^\circ$ ) и сибирском ( $\sim 120^\circ$ ) долготных секторах. Такая форма долготного распределения  $foF2$  связана с распределением склонения и наклонения магнитного поля Земли в географической системе координат.



**Рисунок 4.** Вариации  $foF2$  в области провала в северном полушарии в 00:00 LT для зимних условий при высокой солнечной активности

Благодаря описанию широтной и долготной структуры положения и формы ГИП, представленная эмпирическая модель ГИП может быть использована для изучения двумерной структуры широтно-долготных вариаций  $foF2$  для различных неосвещенных моментов времени. На рис. 4 приведено двумерное распределение  $foF2$  в области провала, полученное с использованием модели ГИП для условий зимнего солнцестояния в полуночном секторе местного времени. Это распределение наглядно иллюстрирует выводы, сделан-

ные ранее о том, что: 1) положение минимума провала изменяется с долготой в географической системе координат; 2) провал, наиболее четко выраженный в Европейском долготном секторе, менее глубок в Американском долготном секторе и имеет очень пологую экваториальную стенку в долготном секторе  $180^{\circ}$ – $210^{\circ}$ . Видно, что наиболее глубокий провал весь день наблюдается на долготах восточного полушария. В Американском долготном секторе провал «зажат» между высокими экваториальной и полярной стенками, поэтому он здесь более узкий, менее глубокий и наблюдается реже.

### Заключение

Разработана эмпирическая модель ГИП северного полушария в зимних ночных условиях, основанная на большом массиве данных трех спутников, что обеспечило более корректный учет закономерностей изменения ГИП, включая зависимость конфигурации ГИП от долготы. Медианная модель построена для типичных средних геомагнитных условий и предназначена, в первую очередь для долгосрочного прогноза ионосферы субавроральных широт. Эта модель применима для любого уровня солнечной активности и размещена на Web-сайте ИЗМИРАН <http://www.izmiran.ru/ionosphere/sm-mit/>.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ №14-05-00788 (Карпачев А.Т., Клименко В.В.) и №15-35-20364 (Клименко М.В.).

### Литература

- Благовещенский Д.В., Жеребцов Г.А. (1987). Высокоширотные геофизические явления и прогнозирование ВЧ радио каналов, М.: Наука, 130 с.
- Карпачев А.Т. (2003). Зависимость формы ГИП от долготы, высоты, сезона, местного времени, солнечной и магнитной активности, *Геомагнетизм и аэрономия*, 43, 256-269.
- Часовитин Ю.К., Широчков А.В., Беспрозванная А.С., Гуляева Т.Л., Денисенко П.В., Арменская О.А., Иванова С.Е., Каширин А.И., Ключева Н.М., Корякина Е.А., Миронова Л.С., Сыкилинда Т.Н., Шушкова В.Б., Водолазкин В.И., Соцкий В.В., Шейдаков Н.Е. (1988). Глобальная эмпирическая модель распределения концентрации, температуры и эффективной частоты соударений электронов в ионосфере, *Ионосферные исследования*, М.: № 44, 6-15.
- Feichter E., Leitinger R. (2002). Properties of the main trough of the F region derived from Dynamic Explorer 2 data, *Ann. Geophys.*, 45, 117-124.
- Halcrow B.W., Nisbeth J.S. (1977). A model of F2 peak electron densities in the main trough of the ionosphere, *Radio Science*, 12, 815-820.
- Karpachev A.T., Deminov M.G., Afonin V.V. (1996). Model of the mid-latitude ionospheric trough on the base of Cosmos-900 and Intercosmos-19 satellites data, *Adv. Space Res.*, 18, 221-230.
- Kohnlein W., Raitt W.J. (1977). Position of the mid-latitude trough in the topside ionosphere as deduced from ESRO-4 observations, *Planet. Space Sci.*, 25, 600-602.
- Werner S., Prolss G.W. (1997). The position of the ionospheric trough as function of local time and magnetic activity, *Adv. Space Res.*, 20, 1717-1722.