УДК 550.338.2

МОДЕЛЬ ИОНОСФЕРНОГО ПРОВАЛА ДЛЯ ДНЕВНЫХ ЗИМНИХ УСЛОВИЙ ПО ДАННЫМ ИСЗ ИНТЕРКОСМОС-19 И СНАМР

© 2019 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 28.05.2018 г. После доработки 10.10.2018 г. Принята к публикации 24.01.2019 г.

Описаны принципы и методика построения эмпирической модели ионосферного провала для спокойных (Kp = 2) дневных (06-18 LT) зимних условий в северном и южном полушариях. Она состоит из моделей положения провала и формы провала. Модель положения описывает долготные вариации положения провала в терминах географической широты для фиксированных моментов местного времени. Модель формы провала описывает широтно-долготные вариации foF2 в интервале географических широт 40°-85° в обоих полушариях. Модель провала является вероятностной, поскольку он не всегда наблюдается в околополуденных условиях. Иначе говоря, задача состоит в построении модели foF2 в дневной высокоширотной зимней ионосфере, которая описывает структуру провала. Для решения этой задачи использовались данные спутников Интеркосмос-19 и СНАМР. Широко использовалась также международная модель ионосферы IRI, однако проверка показывает, что построенная модель более адекватно воспроизводит суточные, долготные и широтные вариации foF2, чем IRI-2016. Вместе с построенной ранее моделью ночного провала можно говорить о создании полной модели foF2 в зимней ионосфере. Полная модель foF2 в ближайшее время будет установлена на сайте ИЗМИРАН: http://www.izmiran.ru/ionosphere/sm-mit/. Модель позволит рассчитать долготные вариации положения провала и широтно-долготные вариации foF2 для любого местного времени, любого уровня солнечной активности в пределах F10.7 = 70-200, для всех зимних месяцев.

DOI: 10.1134/S0016794019040096

1. ВВЕДЕНИЕ

Ионосферный провал был обнаружен по данным спутника Alouette [Muldrew, 1965]. Он является главной структурной особенностью ночной зимней и равноденственной субавроральной ионосферы, поскольку регулярно наблюдается в этих условиях [Карпачев и Афонин, 1998]. Исследованию провала посвящено много работ, основные результаты которых, морфологические характеристики и причины образования провала (провалов) описаны в обзорах [Ahmed et al., 1979; Moffett and Quegan, 1983; Rodger et al., 1992]. Классический главный ионосферный провал (ГИП) является ночным явлением, однако зимой, при низкой солнечной активности провал регулярно наблюдается и днем [Tulunay and Grebowsky, 1978; Ahmed et al., 1979; Oksman, 1982; Evans et al., 1983; Whalen, 1989; Sojka et al., 1990; Werner and Prölss, 1997; Karpachev et al., 1998]. Beроятность наблюдения дневного провала уменьшается по мере роста освещенности высокоширотной ионосферы, т.е. с ростом солнечной активности, в начале и в конце зимы, в полдень, на

411

наиболее освещенных в полдень долготах. Следовательно, модель дневного провала должна быть вероятностной. Но тогда правильнее говорить не о модели провала, а о модели *foF2*. Таким образом, в настоящей работе ставится задача построения модели дневной зимней высокоширотной ионосферы, включающей провал в электронной концентрации.

Попытки создать модель провала предпринимались и ранее, однако они касались только ночного провала и были успешными лишь отчасти [Halcrow and Nisbet, 1977; Feichter and Leitinger, 2002; Wielgosz et al., 2004; Pryse et al., 2006]. Полную модель ночного провала удалось построить только в 2016 г. [Karpachev et al., 2016]. Это связано с тем, что построение модели провала является сложной задачей, связанной с решением целого ряда проблем. Структура ионосферного провала (положение и форма) зависят от местного времени, магнитной и солнечной активности, все это должно быть учтено в модели. Структура провала сильно изменяется с долготой, поэтому полная модель может быть построена только на основе

спутниковых данных. При этом, для регистрации дневных провалов наклонение орбиты спутника должно быть как можно большим. Но тогда для охвата всех часов местного времени требуется много времени, например для спутника СНАМР этот период составляет 4.5 мес. За это время сменится сезон и может довольно сильно измениться солнечная активность. Для построения модели провала необходимо максимально точно знать его положение, поскольку при больших градиентах на его экваториальной и полярной стенках ошибки в определении foF2 могут быть очень большими. Во время геомагнитных возмущений динамика провала является чрезвычайно сложной (см., работу [Аннакулиев и др., 1997] и ссылки в ней). Поэтому при создании модели провала желательно использовать данные только для длительно спокойных условий. Утром наблюдается большой разброс данных, который, как оказалось, связан с наличием двух провалов. Низкоширотный провал, очевидно, является продолжением ночного ГИП в утренний сектор [Rodger et al., 1992]. Высокоширотный провал (HLT) [Grebowsky et al., 1983] связан с авроральным овалом, в полдень он находится внутри зоны высыпаний авроральных частиц. В вечернем секторе НLТ можно спутать с ГИП [Karpachev et al., 1998]. Таким образом, при создании модели в первую очередь необходимо решить проблему разделения провалов, и указать, какую ветвь провала отображает модель. Проблема разделения провалов решалась в работах [Werner and Prölss, 1997; Karpachev et al., 1998], поэтому здесь будет затрагиваться только по мере необходимости, ниже мы будем говорить о единой модели провала в дневной ионосфере. Решение этой задачи состояло из двух этапов - построения модели положения дневного провала для спокойных условий Kp = 2и построения модели формы провала, т.е. определения широтных и долготных вариаций foF2.

2. ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ

Для построения модели были использованы данные внешнего зондирования (foF2) на спутнике Интеркосмос-19 (ИК-19), полученные в 1979—1982 гг. для высокой солнечной активности ($F10.7 \sim 200$). Ионозонд ИК-19 регистрировал ионограммы в трех режимах: через 8, 16 и 64 с, что составляет ~0.5°, 1° и 3°—4° по широте в минимуме провала. Поэтому в последнем случае положение провала определялось приближенно. Всего было использовано ~2500 пролетов спутника в дневной ионосфере обоих полушарий. Наклонение орбиты ИК-19 было 74°, поэтому на некоторых долготах он не достигал высоких геомагнитных широт и не мог регистрировать околополуденные провалы, которые максимально удалены к полюсу.

Данные спутника СНАМР находятся в свободном доступе на сайте http://op.gfz-potsdam.de/

champ. Спутник обращался практически на полярной орбите с наклонением 87°. Это, с одной стороны, позволяет регистрировать все провалы. вплоть до широт дневного каспа, а с другой стороны, затрудняет работу с данными, поскольку для полного охвата всех часов местного времени требуется более 4 месяцев, т.е. больше, чем длится один сезон. К счастью, эту проблему удается решить за счет длительного периода работы спутника при слабо меняющейся солнечной активности, иначе говоря, за счет большого массива однородных данных. СНАМР проводил in situ измерения плазменной частоты fp (или электронной концентрации Ne) на фиксированной высоте, которая за время работы спутника снизилась с ~450 до 300 км. Измерения проводились через ~1° по широте. Значения *fp* затем приводились к *foF*2 по специально разработанной методике, которая будет описана ниже. Данные СНАМР, полученные в 2000-2002 гг., были отобраны для построения модели для высокой солнечной активности (*F*10.7 ≥ 150), а в 2005-2009 гг. – для низкой солнечной активности (*F*10.7 ≤ 100). Всего было рассмотрено ~3900 пролетов спутника в дневной (06-18 LT) ионосфере северного полушария и 3800 пролетов в южном полушарии. Все данные, использованные в работе, относятся к зимним условиям. Рассматривались только длительно спокойные периоды времени с Кр от 0 до 3+, где Кр – текущий 3-часовой индекс магнитной активности.

На рисунке 1а, в приведены широтные профили foF2, полученные по данным ИК-19 в северном (а) и южном (в) полушариях. Профиль 1 в северном полушарии был зарегистрирован 11 декабря 1980 г. для $Kp = 3_0$ в послеполуденномвечернем секторе, в минимуме провала местное время 16.7 ч, долгота 71.5°. Он показывает наличие провала с крутой экваториальной стенкой и достаточно хорошо выраженной полярной стенкой. Профиль 2 в северном полушарии был зарегистрирован 20 декабря 1979 г. в послеполуденном секторе при Kp = 1+, местное время 14.0 ч на широте 74°, долгота 55°. Минимум провала на этом профиле не регистрируется, поскольку он расположен полярнее, а псевдо-полярная стенка, скорее всего, является следствием вариаций foF2 с долготой. Профиль 3 в южном полушарии был зарегистрирован 22 августа 1980 г. при Kp = 2+, местное время 6.4 ч в минимуме провала, долгота 247°. Видно, что в утреннем секторе наблюдается четко выраженный провал на широте ~70°. Наконец, профиль 4 в южном полушарии также был получен в послеполуденном секторе 11 июня 1979 г. при Kp = 3 - в долготном секторе 330°, местное время ~14.5 ч на широте 74°. Наблюдается точно такая же ситуация, как и в северном полушарии. Таким образом, наклонение орбиты ИК-19 позволяет регистрировать провалы в утреннем и вечернем секторах, но не достигает минимума про-



Рис. 1. Примеры широтных профилей критической частоты *foF*2 по данным ИК-19 (слева) и плазменной частоты *fp* по данным СНАМР (справа) на высоких широтах в северном и южном полушариях. Геофизические условия для каждого случая указаны в тексте.

вала в околополуденном секторе. Поэтому данные ИК-19 использовались в основном для моделирования экваториальной стенки провала в интервале широт 40°-74°.

Провал формируется в геомагнитной системе координат, следовательно вариации его положения с долготой в географической системе координат для фиксированного местного времени привязаны, в первом приближении, к долготным вариациям фиксированной геомагнитной широты. Поэтому в северном полушарии провал наиболее удален к северу на долготах Евразии, а к югу – на долготах Америки. Поскольку на этих долготах условия освещенности довольно сильно различаются, то и структура провала различается. На рис. 16 приведены типичные примеры провалов в двух характерных долготных секторах, северного полушария, полученные по данным СНАМР в период солнцестояния в декабре 2005 г. Они относятся к полуденным условиям, поскольку наиболее важно рассмотреть, как выглядит структура провала при наибольшей освещенности зимней ионосферы. Профиль 2 был получен 23 декабря 2005 г. для 12.6 ч местного времени, Kp = 0 в долготном секторе 100°. Провал в этом секторе формируется на относительном низком фоновом уровне, поэтому он выражен настолько ярко, что ничем не отличается от ночного провала. Его минимум максимально удален к полюсу. Профиль 1 был получен 23 декабря 2005 г. для 12.2 ч, *Кр* = 0 и представляет типичный провал в долготном секторе 306°. В этом секторе, наоборот, провал максимально удален к экватору и формируется на высоком фоновом уровне, в результате он очень узкий и неглубокий. В южном полушарии даже в большом массиве данных СНАМР не оказалось измерений для полудня вблизи солнцестояния, поэтому рассмотрим широтные профили foF2 для июля и августа 2007 г. В южном полушарии (рис. 1г) характерные долготные сектора фактически ме-

няются местами, по сравнению с северным полушарием. Поэтому здесь, наоборот, провал наиболее удален к полюсу в долготном секторе 300° – кривая 4. Этот профиль был получен 24 июля 2007 г. для 14.1 ч, Kp = 1. Фоновый уровень на экваториальной стенке провала в южном полушарии ниже, чем в северном, поэтому провал выглядит менее выраженным. На профиле 3, полученном 20 июля 2007 г., для 12.5 ч, *Кр* = 1 в противоположном долготном секторе 90°, провал также относительно неглубокий, как и в северном полушарии (кривая 2). В общем и целом провал в южном полушарии зрительно выражен менее ярко, чем в северном, однако напомним, что южном полушарии приведенные примеры были получены через месяц после солнцестояния. Отметим также, что во всех случаях полярная стенка провала очень высокая, но это отчасти потому, что для иллюстрации подбирались наиболее ярко выраженные примеры провалов. Итак, в зимней ионосфере при низкой солнечной активности провал довольно хорошо выражен даже в полдень, по крайней мере, в период солнцестояния. Что касается остальной зимы, то этот вопрос будет ниже обсуждаться дополнительно, а пока ясно, что построение модели зимнего дневного провала вполне оправлано.

3. ВЕРОЯТНОСТЬ НАБЛЮДЕНИЯ ДНЕВНОГО ЗИМНЕГО ПРОВАЛА

На рисунке 2 вверху приведены суточные вариации вероятности Р наблюдения зимнего прополученные по данным СНАМР вала. 2001-2002 гг. для высокой солнечной активности (*F*10.7 ≥ 150) и в 2006-2009 гг. – для низкой активности (*F*10.7 ≤ 80). Использованы данные для середины зимы, т.е. декабря-января в северном полушарии и для июня-июля в южном. Вероятность наблюдения зимнего ночного провала по данным СНАМР при низкой солнечной активности выше 95%. В дневной ионосфере провал не так хорошо выражен, но наблюдается также очень часто P > 80%. При высокой солнечной активности провал наблюдается реже, но даже в полдень величина $P \sim 70\%$ и увеличивается до 90% к полуночи. Однако ясно, что в начале и в конце зимы вероятность наблюдения провала будет понижена, во всяком случае, в полдень. Таким образом, как уже говорилось, модель дневного провала должна быть вероятностной. Точную зависимость вероятности появления провала от сезона и местного времени невозможно определить даже на основе большого массива данных СНАМР, поскольку с течением времени и сезон, и местное время изменяются одновременно. Тем не менее, удалось установить следующие закономерности, которые отражены на рис. 2 внизу как раз для дневных часов 10–14 LT. При низкой солнечной активности в северном полушарии провал с вероятностью более 50% наблюдается с 15 октября по 15 марта, а в южном полушарии — все четыре месяца зимы. При высокой солнечной активности провал в северном полушарии с вероятностью больше 50% также наблюдается практически всю зиму, а в южном полушарии — только в июне и июле. Поэтому в южном полушарии провал в мае и августе в период 10—14 LT, хотя и представлен в модели, но выражен слабо и наблюдается практически всегда все 4 месяца зимы в обоих полушариях. При отсутствии провала мы будем говорить просто о модели *foF*2 в дневной высокоширотной ионосфере.

4. МОДЕЛЬ ПОЛОЖЕНИЯ ПРОВАЛА

Как уже отмечалось выше, для построения адекватной модели необходимо максимально точно знать положение его минимума. Оно определяется с большой неточностью из-за большого разброса данных [Rycroft and Burnell, 1970; Tulunay and Grebowsky, 1978; Ahmed et al., 1979; Oksman, 1982; Karpachev et al., 1996, 1998; Werner and Prölss, 1997]. Большой разброс данных связан, вопервых, с наличием двух, а иногда и трех разных провалов в фиксированном секторе местного времени. Вопрос разделения провалов очень сложный и будет рассмотрен ниже только по мере необходимости. Во-вторых, разброс резко возрастает при резких изменениях геомагнитной активности (см. работу [Аннакулиев и др., 1997] и ссылки в ней). Поэтому в работе рассматриваются только длительно спокойные периоды времени с *Кр* от 0 до 3+. В таком случае для определения положения провала без большой потери в точности можно пользоваться текущим Кр-индексом. Наконец, даже в спокойные периоды времени положение провала сильно зависит от уровня геомагнитной активности, местного времени, долготы и, как оказалось, солнечной активности. С ростом магнитной активности, при прочих фиксированных условиях, дневной провал сдвигается к экватору на ~1.5° на единицу Кр. Поскольку модель строится для спокойных условий, все дневные данные приводились к Kp = 2 согласно этой простой зависимости. Например, при Кр = 0 наблюдаемая широта провала уменьшалась на 3°, а при Kp = 3 увеличивалась на 1.5°. Это позволяет уменьшить разброс данных при статистической обработке данных и соответственно увеличить точность определения положения провала. Широта минимума провала до полудня увеличивается, а после полудня уменьшается, поэтому было принято решение описать долготные вариации положения дневного провала для фиксированных моментов местного времени с интервалом два часа: т.е. для 08, 10, 12, 14 и 16 LT. Долготные вариации положения провала для 06 и 18 LT были выделены ранее при построении модели ночного провала [Karpachev et al., 2016]. Для всех этих мо-



Рис. 2. Вверху: зависимость вероятности *P* наблюдения ионосферного провала от местного времени, выделенная по данным СНАМР для зимних спокойных условий при высокой (ВСА) и низкой (НСА) солнечной активности. Внизу: месячные вариации *P*, полученные в интервале 10–14 LT для высокой и низкой солнечной активности в северном (СП) и южном (ЮП) полушариях.

ментов местного времени долготные вариации положения провала определялись в интервале ± 0.5 ч, т.е. например для 08 ± 0.5 LT. Положение провала также зависит от солнечной активности. Поэтому все зависимости от долготы были определены отдельно для высокой солнечной активности (*F*10.7 \geq 180) по данным ИК-19 и CHAMP и для низкой солнечной активности (*F*10.7 \leq 100) только по данным CHAMP. Они представлены ниже в графическом виде.

Несмотря на разброс данных, долготные вариации положения провала для всех часов местного времени, кроме утренних, определяются однозначно и довольно точно. Это связано, во-первых, с тщательным отбором данных, о чем говорилось выше. А, во-вторых, амплитуда долготного эффекта в географической системе координат, в дневные часы намного больше величины 2σ , где σ – стандартное отклонение. На рисунке 3 приведены для примера вариации положения минимума провала для 12 LT в северном и южном полушариях. Данные, как и везде, приведены к Kp = 2. На каждом графике указаны значения коэффициента корреляции r и среднеквадратичного отклонения данных σ от аппроксимирующей кривой, в качестве которой использовался полином 6-й степени. Из рисунка 3 видно, что долготные вариации в обоих полушариях выделяются уверенно: коэффициент корреляции высокий ($r \sim 0.90$), а среднеквадратическое отклонение составляет всего $\sim 2^{\circ}$. Амплитуда эффекта A составляет 10° в северном полушарии и достигает 23° в южном, поскольку расстояние между магнитным и географическим полюсами в южном полушарии гораздо больше, чем в северном. В итоге минимум провала в южном полушарии занимает очень большую полосу широт от 60° S до 85° S.

Разброс данных несколько возрастает в 16–18 LT, поскольку в это время высокоширотный провал (HLT) примыкает близко к главному ионосферному провалу [Grebowsky et al., 1983] и провалы можно спутать. Однако они довольно сильно отличаются по форме [Karpachev et al., 1998], что позволяет практически исключить высокоширотные повалы из массива данных. Наибольшие проблемы с определением положения провала



Рис. 3. Долготные вариации положения провала для околополуденных условий, выделенные для низкой солнечной активности в северном и южном полушариях по данным СНАМР. Указаны амплитуда *A*, среднеквадратическое отклонение от и коэффициент корреляции *r*.

имеют место в утреннем секторе, где наблюдается чересчур сильный разброс данных. На рисунке 4а приведен широтный профиль *fp*. полученный по данным СНАМР в северном полушарии 26 ноября 2002 г. в долготном секторе 250° для $Kp = 2_0$ и 7.9 LT. Этот профиль иллюстрирует наличие двух провалов с сильно разнесенными по широте минимумами на широтах 58° и 68°. Низкоширотный провал, очевидно, является продолжением ночного ГИП, который при вращении Земли выносится в утренний сектор [Rodger et al., 1992]. Он выглядит обычно как на рис. 4а – без хорошо выраженной полярной стенки. И наоборот, высокоширотный провал может быть неглубоким, но с ярко выраженной полярной стенкой. Высокая полярная стенка обусловлена высыпаниями мягких частиц на экваториальной границе аврорального овала. Таким образом, этот провал выглядит более привычно как структура, связанная с авроральным овалом. Оба провала не обязательно наблюдаются одновременно, и не всегда так четко выражены, как на рис. 4, но оба регистрируются регулярно, что и приводит к сильнейшему разбросу данных в утренние часы. Широтный профиль на рис. 46 был получен 23 января 2006 г. также в северном полушарии в долготном секторе 217° при *Кр* = 2+ для 10.0 LT. На этом широтном

разрезе наблюдается целых три провала. Низкоширотный и следующий за ним провал (на широте ~72°) соответствуют двум провалам на рис. 4*a*. При этом низкоширотный провал на рис. 4*б* выражен еще более четко, чем на рис. 4*a*. Самый высокоширотный провал на рис. 4*б* находится на широте ~83°, глубоко внутри аврорального овала. Этот провал наблюдается нерегулярно и далее не рассматривается. Сложные ситуации, подобно рассмотренным выше, встречаются довольно часто при обработке данных по провалу, поэтому отбор данных из большого массива данных занимает много времени.

Рассмотрим, как два провала проявляются при статистической обработке данных в утреннем секторе. На рисунке 5 приведены долготные вариации провала в северном полушарии при высокой солнечной активности в интервале 07–09 LT. Четко видно наличие двух ветвей провала – низкоширотной и высокоширотной. Низкоширотный провал чаще наблюдается в интервале 07–08 LT, а высокоширотный – в интервале 08–09 LT, но нередко они наблюдаются одновременно, как на рис. 4. Низкоширотный провал расположен намного экваториальнее аврорального овала и исчезает к полудню. И наоборот, более высокоширотный провал связан с авроральным овалом и



Рис. 4. Примеры широтных профилей плазменной частоты *fp*, полученных по данным СНАМР в дневной ионосфере северного полушария.

2019

плавно переходит в дневной провал, создавая с ним единую ветвь провала. Поэтому было принято решение отразить в модели в этот период времени только более высокоширотный провал. Таким образом, в модели для 08 LT при высокой солнечной активности в северном полушарии отражен только высокоширотный провал, а широтный профиль foF2 в области низкоширотного провала сглажен. Однако не следует удивляться, если на экспериментальных широтных разрезах foF2 на широтах низкоширотного провала будет наблюдаться достаточно глубокий минимум, как на рис. 4. На рисунке 5 приведены аппроксимирующие кривые не только для высокоширотного провала, но и для всего массива данных. Кривая для всего массива данных носит скорее формальный характер, но она будет использована ниже (на рис. 7) для сравнения с другими кривыми для 08 LT.

Рассмотрим ситуацию в утреннем секторе в южном полушарии также при высокой солнечной активности. На рисунке 6 приведены долготные вариации положения провала для 07 и 08 LT. Хорошо видно, что в 07 LT в широком долготном интервале (120°-270°) также наблюдается две ветви провала. Однако уже в 08 LT остается только один, более высокоширотный. Поскольку моделирование производится с интервалом в 2 ч, ситуация с двумя провалами в 07 LT не повлияла на конечный итог моделирования в южном полушарии, хотя это, также как и в северном полушарии, следует иметь в виду при использовании данных для этих условий. Отметим, наконец, что при низкой солнечной активности в обоих полушариях разброс данных меньше, провалы на две ветви четко не разделяются, поэтому долготные вариации положения провала для 08 LT были аппроксимированы одной кривой. Физические причины обсуждаемого поведения провала в утреннем секторе требуют отдельного анализа.

Для построения модели положения провала данные были обработаны для всех часов местного времени аналогично 12 LT, как на рис. 3. Затем они были сведены вместе и скорректированы так, чтобы суточный ход имел гладкий характер на всех долготах. Полученная модель положения провала представлена для иллюстрации в графическом виде на рис. 7 для северного и южного полушарий. Напомним, что все кривые для 08 LT были получены усреднением всего массива данных, независимо от того, разделялись провалы, или нет. Из рисунка 7 видно, что характер долготного эффекта (амплитуда и форма) не принципиально изменяется в течение дня и в северном, и в южном полушариях, только максимумы и минимумы несколько сдвигаются по долготе. Как уже отмечалось выше, характерные долготные сектора (с минимальной и максимальной широтой) меняются местами при переходе из одного полушария в другое. Долготный сектор 180°-240° также является особенным, поскольку в северном полушарии провал (при высокой солнечной активности) в этом секторе очень сильно, почти на 20°, изменяет свое положение в течение дня, а в южном полушарии гораздо меньше.

5. МОДЕЛЬ ФОРМЫ ПРОВАЛА

После того, как положение провала было определено, строилось распределение *foF2* в области провала. Сначала выделялись долготные



Рис. 5. Две ветви провала в утреннем секторе (07–09 LT) в северном полушарии при высокой солнечной активности. Аппроксимирующие кривые приведены для высокоширотного провала и для полного массива данных.

вариации *foF*2 по данным ИК-19 для высокой солнечной активности и *fp* по данным СНАМР для низкой активности на широтах $40^{\circ}-85^{\circ}$ с интервалом 5°. Долготные вариации можно выделять для фиксированных моментов UT или LT. Однако UT-вариации включают в себя долготные



Рис. 6. Долготные вариации положения провала в южном полушарии при высокой солнечной активности для 07 ± 0.5 LT и 08 ± 0.5 LT.

и суточные вариации, т.е. они устроены более сложно, чем чисто долготные вариации для фиксированного LT. Поэтому, как и для положения провала, выделялись долготные вариации электронной концентрации для 06-18 LT с интервалом 2 ч. Долготные вариации электронной концентрации на некоторой фиксированной высоте выше максимума слоя F2 не сильно отличаются по характеру от долготных вариаций концентрации в максимуме слоя F2 [Ben'kova et al., 1990]. На рисунке 8 для примера приведены в сравнении долготные вариации foF2 и fp на 45° в северном и южном полушариях для 14 LT, поскольку они наиболее характерны для дневных условий. Решению задачи выделения долготного эффекта (ДЭ) способствовали многолетние исследования его характера по данным ИК-19 (см., например, работы [Карпачев, 2008; Klimenko et al., 2016] и ссылки в них). Из рисунка 8 хорошо видно, что характер ДЭ в электронной концентрации, также как и в положении провала, кардинально отличается в северном и южном полушариях. Долготные вариации fp и foF2 в каждом полушарии не сильно отличаются, т.е. характер ДЭ в дневной ионосфере слабо изменяется при переходе от низкой активности к высокой. Что касается амплитуды ДЭ, то она значительно больше при высокой солнечной активности, что позволяет достаточно уверенно выделить ДЭ по данным ИК-19, поскольку всегда амплитуда ДЭ $A > 2\sigma$, где σ – среднеквадратическое отклонение. При низкой солнечной активности амплитуда ДЭ меньше, но к счастью, массив данных СНАМР большой и довольно однородный, поэтому разброс данных небольшой и ДЭ при низкой солнечной активности также выделяется вполне уверенно.



Рис. 7. Усредненные долготные вариации положения минимума дневного провала для различных часов местного времени в северном и южном полушариях при высокой и низкой солнечной активности. Для большей наглядности некоторые кривые приведены штриховыми линиями.



Рис. 8. Долготные вариации *fp* по данным СНАМР для низкой солнечной активности (слева) и *foF2* по данным ИК-19 для высокой активности (справа) для 14 LT на широтах 45° N и 45° S. Указаны амплитуда *A*, среднеквадратическое отклонение σ и коэффициент корреляции *r*.

Долготные вариации fp, полученные по данным СНАМР, необходимо преобразовать в вариации *foF2*. Обычно эта задача решается следующим образом: значения *fp* в каждой точке пересчитываются в значения *foF2* по N(h)-профилю, рассчитанному в модели IRI для данных условий. Однако анализ показал, что при этом получаются неадекватные значения *foF2*. Поэтому нами эта задача решалась также с помощью IRI, но проще и эффективнее. На каждой широте средние значения fp (для всех долгот) приводились к средним значениям foF2, полученным по модели IRI. А поскольку модель IRI построена, в основном, по наземным данным, это означает, что при построении модели косвенно учитывались и данные сети наземных ионозондов. Для высокой солнечной



Рис. 9. Долготные вариации *foF*2 на широте 45° N и 45° S для различных часов местного времени при высокой и низкой солнечной активности.

активности долготные вариации *foF*2 рассчитывались по модели IRI-2016 для 22 декабря 1979 г. (*F*10.7 = 199.4) в северном полушарии и для 22 июня 1980 г. (*F*10.7 = 205.6). Для низкой солнечной активности для 22 декабря 2007 г. (*F*10.7 = = 72.7) и 22 июня 2008 г. (*F*10.7 = 68.7). Таким образом, под низкой солнечной активностью в модели понимается *F*10.7 ~ 70, а под высокой — *F*10.7 ~ 200.

Рассмотрим, как изменяется характер ДЭ в течение дня. На рис. 9 показаны долготные вариации foF2 на широте 45° в обоих полушариях для низкой и высокой солнечной активности для разных часов местного времени. Как видно из рис. 9, в 08 LT характер ДЭ изменяется при переходе от низкой солнечной активности к высокой, однако в обоих полушариях все время наблюдается два максимума и два минимума foF2, хотя их фазы могут меняться. Характер ДЭ довольно сильно изменяется при переходе от утренних часов к дневным. Период времени около 10 LT является переходным, в этот период форма ДЭ наиболее сильно изменяется при переходе от низкой солнечной активности к высокой. В 12 LT и 14 LT характер ДЭ остается наиболее стабильным в обоих полушариях, что уже было видно на рис. 8. Максимальной амплитуды ДЭ днем достигает в 16 LT в обоих полушариях и при любой солнечной активности. В южном полушарии весь день явно преобладает первая гармоника, в северном полушарии для описания ДЭ требуются две первых гармоники. Изменение характера ДЭ (формы и амплитуды) в течение дня и при переходе от низкой у высокой солнечной активности означает, что изменяются факторы, их вызывающие. Однако этот вопрос выходит за рамки данной статьи.

Поскольку ИК-19 имел наклонение орбиты всего 74°, долготные вариации *foF*2 на более высоких широтах выделялись по данным СНАМР для высокой солнечной активности по описанной выше методике. Долготные вариации, выделенные на широтах 40°, 45°, ... 85° как для высокой, так и низкой солнечной активности позволяли построить широтные разрезы *foF*2 с интервалом 5°; по долготе они строились с интервалом 15°. Широтные вариации *fp* в области минимума провала и на его полярной стенке корректировались в каждом долготном секторе по данным СНАМР. Они определялись методом, аналогичным методу наложения эпох: профили *fp*



Рис. 10. Долготные вариации *foF2* при низкой солнечной активности для 12 LT на разных широтах и в минимуме провала (штриховая кривая) в северном и южном полушариях.

сдвигались по широте так, чтобы минимум провала соответствовал модельному положению провала для данных условий. Это было сделано потому, что положение провала, как уже обсуждалось выше, изменяется на несколько градусов в диапазоне значений Кр от 0 до 3+, так что при простом усреднении всех данных широтный профиль fp размывается и провал становится широким и неглубоким. После усреднения методом эпох значения fp, так же, как и выше, преобразовывались в значения foF2 и стыковались с полученными ранее широтными профилями на экваториальной стенке провала. Затем широтные профили сглаживались и оцифровывались через 1°. В результате для каждого часа местного времени (с интервалом 2 ч) создавалась таблица значений foF2 с интервалом 1° по широте и 15° по долготе. Каждая таблица foF2 дополнялась значениями широты минимума провала на каждой долготе. Эти таблицы являются основой модели, по ним рассчитываются с помощью интерполяции долготные вариации положения провала и долготно-широтные вариации foF2 для любого момента местного времени и любого значения солнечной активности.

ГЕОМАГНЕТИЗМ И АЭРОНОМИЯ том 59 № 4 2019

Рассмотрим, как изменяется характер ДЭ с широтой. На рисунке 10 показаны для примера долготные вариации foF2, полученные при низкой солнечной активности для 12 LT на разных широтах в северном и южном полушариях. Видно, что характер долготного эффекта в обоих полушариях сохраняется при переходе от широты 45° к широте 65°. Однако гладкие вариации foF2 с долготой начинают ломаться, когда мы достигаем минимума провала, как это видно на широте 65° в южном полушарии. В северном полушарии это справедливо для широты 70°. Максимальной амплитуды ДЭ достигает в минимуме провала, что опять же справедливо для обоих полушарий и не только для дневных, но и для ночных условий [Karpachev et al., 2016].

На рисунке 11 представлены широтные профили *foF2* в наиболее характерных долготных секторах Азиатском (150°) и Американском (270°) северного и южного полушарий для различных моментов местного времени. Эти вариации в графическом виде представляют модель формы провала для декабря в северном полушарии и июня — в южном при низкой солнечной активности, когда провал четко выражен и наблюдается

150° E 270° E foF2. MFII 12 6 6 СП НСА СП НСА 5 5 16 4 4 16 08 06 18 3 3 06 2 2 1 L 40 1 50 60 70 80 90 40 50 60 70 80 90 6 6 ЮП_НСА ЮП_НСА 14 5 5 10 12 16 4 4 6 08 18 3 3 18 08 06 2 2 06 1 40 -50-60 -70-80-90-40 -50-60 -70-80-90Широта, град Широта, град

Рис. 11. Широтные вариации *foF2* для различных часов местного времени в наиболее характерных долготных секторах 150° и 270° при низкой солнечной активности в декабре в северном полушарии и в июне – в южном.

весь день. При обсуждении индивидуальных примеров на рис. 1 было показано, что с долготой сильно изменяется не только положение, но и форма провала – его глубина и ширина. Рассмотрим с этой точки зрения модельные широтные профили *foF2* на рис. 11. В северном полушарии провал дальше всего удален от полюса в долготном секторе 270°, поэтому на этих долготах ионосфера наиболее освещена в полдень. Соответственно в этом секторе в 12-14 LT провал образуется на высоком фоновом уровне и поэтому слабо выражен. Однако в остальное время, включая 10 и 16 LT, в этом секторе формируется достаточно хорошо выраженный провал, как правило, с крутой экваториальной стенкой и невысокой полярной стенкой. В долготном секторе 150° провал ближе всего расположен к полюсу, ионосфера здесь слабо освещена в полдень, что опять же определяет специфичную форму провала с пологой экваториальной стенкой и также невысокой полярной стенкой. В южном полушарии характерные долготные сектора меняются местами. В долготном секторе 270° провал максимально удален к полюсу, поэтому на широтах 80°-85° фиксируется только основание полярной стенки, экваториальная стенка пологая, как и в северном полушарии. И наоборот, в долготном секторе 150° провал еще дальше удален к экватору, освещенность ионосферы возрастает и поэтому не только в 12-14 LT, но и в 10 LT и 16 LT провал слабо выражен.

На рисунке 12 для иллюстрации показано распределение foF2 в северном и южном полушариях для полуденных условий при низкой солнечной активности. LT-карты в интегральном виде представляют характеристики высокоширотной ионосферы, которые детально обсуждались выше. Поэтому коротко отметим только главные особенности. Из сравнения карт хорошо видна сильная асимметрия полушарий. Она проявляется и в долготных, и в широтных вариациях foF2. По абсолютным значениям foF2 разница, в общем, небольшая. Положение провала гораздо сильнее изменяется в южном полушарии, характерные долготные сектора меняются местами при переходе из одного полушария в другое. Полуденный провал хорошо выражен в полдень при низкой солнечной активности, он несколько глубже и шире в южном полушарии.



Рис. 12. Распределение *foF2* для 12 LT в северном (вверху) и южном (внизу) полушариях при низкой солнечной активности. Жирными кривыми показано положение минимума провала.

6. ТЕСТИРОВАНИЕ МОДЕЛИ

Как следует из вышеизложенного, модель IRI неоднократно использовалась при построении модели. При этом обычно использовалась опция URSI. Однако новая модель существенно точнее модели IRI, поскольку, во-первых, она более адекватно воспроизводит долготные вариации foF2, что особенно сильно сказывается над океанами и в южном полушарии. А, во-вторых, новая модель впервые, как мы полагаем, адекватно воспроизводит структуру провала. Рассмотрим, насколько сильно отличается новая модель от IRI-2016, и при каких условиях – рис. 13. Начнем с полуденных условий низкой солнечной активности, когда дневной провал достаточно хорошо выражен. Профиль 13а был получен в 12 LT над Европой, где много наземных станций. Наземные станции в полдень точно отражают значения foF2, поэтому модель провала и IRI практически совпадают, кроме полярной стенки провала, которую IRI вообще не воспроизводит. Профили

кой активности, но в южном полушарии над Индийским и Тихим океанами. IRI сильно расходится с моделью и не воспроизводят провал, поскольку на акваториях океанов станций наземного зондирования нет. При высокой солнечной активности провал в полдень выражен плохо, поэтому сравним утренние (13 ϵ , ∂ и e) и вечерние (13ж, з и и) условия. На рисунке 13г приведен широтный профиль в Австралийском долготном секторе 120° в южном полушарии, где опять же много станций, поэтому, хотя IRI структуру высокоширотной ионосферы и не воспроизводит, все же не сильно отличается от модели провала по абсолютным значениям. И наоборот, на долготах Тихого океана (рис. 13 ∂ , *e*) и в северном, и в южном полушарии наблюдаются большие расхождения. В 16 LT на долготах Европы (рис. 13ж) IRI прекрасно согласуется с новой моделью, но провал, довольно глубокий, не воспроизводит. IRI не всегда адекватно воспроизводит широтный профиль foF2 даже при наличии на-

136 и 136 были получены также в полдень для низ-



Рис. 13. Широтные профили *foF2*, рассчитанные по модели провала и модели IRI-2016 (штриховые кривые), для разных условий. Подробности в тексте.

земных станций, как это видно на рис. 133, полученном в южном полушарии для 16 LT, 120°, в отличие от рис. 13г. И наконец, на рис. 13и приведены широтные профили *foF2*, полученные в 16 LT при низкой солнечной активности в северном полушарии на долготе 300°. Для сравнения приведены профили *foF2*, рассчитанные по IRI в опции URSI и CCIR. Профиль, полученный в опции CCIR еще сильнее расходится с моделью, чем профиль URSI. Это еще раз подтверждает правильность использования IRI именно в опции URSI. Итак, можно сделать простой вывод: новая модель гораздо точнее, чем IRI-2016, воспроизводит структуру высокоширотной ионосферы, расхождения особенно большие над океанами.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выделим основные положения проделанной работы. Впервые построена эмпирическая модель ионосферного провала в foF2 в зимней дневной высокоширотной ионосфере северного и южного полушарий. Это потребовало больших усилий для решения разного рода проблем, поскольку провал является динамичной структурой, характеристики которой до сих пор до конца не изучены. Модель построена по данным ИСЗ Интеркосмос-19 и СНАМР по довольно сложной методике, детально описанной по ходу изложения. Модель строилась в два этапа: сначала определялись долготные вариации положения провала для всех часов местного времени с интервалом 2 ч. Еще раз отметим, что при фиксированном уровне геомагнитной активности, положение провала зависит от местного времени, долготы (полушария) и, как оказалось, от солнечной активности. На втором этапе создавалась модель формы провала, т.е. строилось долготно-широтное распределение *foF2* в интервале $40^{\circ}-85^{\circ}$. Распределение *foF2* представлено в модели через 1° по широте и 15° по долготе. При создании глобального распределения foF2 абсолютные значения foF2 контролировались с помощью модели IRI, следовательно, в модели косвенно учтены и данные мировой сети наземных станций. Характер долготных вариации foF2 достаточно детально рассмотрен в работе. Что касается их причин, то это тема отдельного исследования. Отметим, что

поведение и структура дневного провала (и ионосферы вообще) очень сильно отличается в северном и южном полушариях, т.е. имеет место сильная асимметрия полушарий.

Модель отображает спокойные геомагнитные условия (Kp от 0 до 3+), среднее значение Kp = 2. Модель положения дневного провала справедлива для всей зимы, т.е. для ноября—февраля в северном полушарии и для мая—августа — в южном. Модель формы провала наиболее точно соответствует условиям середины зимы, т.е. для декабряянваря и июня-июля соответственно. Однако в ближайшее время она будет расширена на все месяцы зимы и установлена на сайте ИЗМИРАН в рамках полной (для всех суток) модели: http://www.izmiran.ru/ionosphere/sm-mit/.

Точность определения положения минимума провала составляет $\sim 2^{\circ}$ для большинства условий. Наибольший разброс данных наблюдается в утреннем секторе 07—08 LT при высокой солнечной активности, это связано с наличием двух провалов. Точность описания *foF2* в зависимости от условий составляет доли единицы МГц на экваториальной стенке провала и падает на полярной стенке.

Международная модель IRI не только не воспроизводит структуру провала, что хорошо известно, но и неадекватно воспроизводит долготно-широтные вариации foF2 в зимней летней высокоширотной ионосфере и потому нуждается в значительной коррекции.

8. БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит спонсоров и операторов эксперимента CHAMP, а также Немецкий Геоисследовательский центр и Немецкий аэрокосмический центр (Deutsches GeoForschungs Zentrum (GFZ) Potsdam and German Aerospace Center (DLR)).

9. ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа поддержана грантом Российского Научного Фонда № 17-77-20009.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

— Аннакулиев С.К., Афонин В.В., Деминов М.Г., Карпачев А.Т. Эмпирическая формула для положения главного ионосферного провала в период магнитной бури // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 37. № 3. С. 183–187. 1997.

- Карпачев А.Т., Афонин В.В. Зависимость вероятности наблюдения ионосферных провалов от сезона, местного времени, долготы и уровня магнитной активности // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 38. № 3. С. 79–91. 1998.

- Карпачев А.Т. Крупномасштабная структура плазмы верхней ионосферы по данным спутниковых наблюдений / Энциклопедия низкотемпературной плазмы, сер. Б. Т. 1–3. "Ионосферная плазма", Ч. 1. М.: ЯНУС-К. С. 391–457. 2008.

- Ahmed M., Sagalyn R.C., Wildman P.J.L., Burke W.J. Topside ionospheric trough morphology: occurrence frequency and diurnal, seasonal, and altitude variations // J. Geophys. Res. V. 84. № 2. P. 489–498. 1979.

− Ben'kova N.P., Deminov M.G., Karpachev A.T. et al. Longitude features shown by topside sounder data and their importance in ionospheric mapping // Adv. Space Res. V. 10. \mathbb{N} 8. P. 57–66. 1990.

- Evans J.V., Holt J.M., Wand R.H. On the formation of daytime troughs in the F-region within the plasmasphere // Geophys. Res. Lett. V. 10. № 5. P. 405-410. 1983.

- Feichter E., Leitinger R. Properties of the main trough of the F region derived from Dynamic Explorer 2 data // Ann. Geophys. V. 45. № 1. P. 117–124. 2002.

- Grebowsky J.M., Taylor H.A., Lindsay J.M. Location and source of ionospheric high latitude troughs // Planet. Space Sci. V. 31. № 1. P. 99–105. 1983.

- Halcrow B.W., Nisbet J.S. A model of F2 peak electron densities in the main trough region of the ionosphere // Radio Sci. V. 12. № 5. P. 815–820. 1977.

- Karpachev A.T., Deminov M.G., Afonin V.V. Model of the mid-latitude ionospheric trough on the base of Cosmos-900 and Interkosmos-19 satellites data // Adv. Space Res. V. 18. № 6. P. 221–230. 1996.

- Karpachev A.T., Deminov M.G., Afonin V.V. Two branches of day-time winter ionospheric trough according to Cosmos-900 data at F2-layer heights // Adv. Space Res. V. 22. \mathbb{N}_{2} 6. P. 877–882. 1998.

- Karpachev A. T., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Pustovalova L.V. Empirical model of the main ionospheric trough for the nighttime winter conditions // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 146. P. 149–159. 2016.

https://doi.org/10.1016/j.jastp.2016.05.008

- 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 // Rus. J. Physic. Chem. B. V. 10. \mathbb{N}° 11. P. 91–99. 2016.

- *Moffett R.J., Quegan S.* The mid-latitude trough in the electron concentration of the ionospheric F-layer: A review of observations and modeling // J. Atmos. Terr. Phys. V. 45. N $^{\circ}$ 5. P. 315–343. 1983.

- Muldrew D.B. F-layer ionization troughs deduced from Alouette data // J. Geophys. Res. V. 70. № 11. P. 2636-22650. 1965.

- Oksman J. Apparent diurnal movements of the trough it total electron content (TEC) of the ionosphere // Geophysica. V. 19. № 1. P. 13–22. 1982.

- *Pryse S.E., Kersley L., Malan D., Bishop G.J.* Parameterization of the main ionospheric trough in the European sector // Radio Sci. V. 41. RS5S14. 2006. https://doi.org/10.1029/2005RS003364 - Rodger A.S., Moffett R.J., Quegan S. The role of ion drift in the formation of ionization troughs in the mid-and highlatitude ionosphere – a review // J. Atmos. Terr. Phys. V. 54. № 1. P. 1–30. 1992.

- *Rycroft M.J., Burnell S.J.,* Statistical analysis of measurements of the ionospheric trough and plasmapause // J. Geophys. Res. V. 75. № 28. P. 5600-5604. 1970.

- Sojka J.J., Schunk R.W., Whalen J.A. The longitude dependence of the dayside F region trough: a detailed modelobservation comparison // J. Geopys. Res. V. 95. № 9. P. 15275-15280. 1990. - Tulunay V.K., Grebowsky J.M. The noon and midnight mid-latitude trough as seen by Ariel 4 // J. Atmos. Terr. Phys. V. 40. \mathbb{N} 7. P. 845–855. 1978.

- Werner S., Prölss G.W. The position of the ionospheric trough as a function of local time and magnetic activity // Adv. Space Res. V. 20. N_{\odot} 9. P. 1717–1722. 1997.

- Whalen J.A. The daytime F layer trough and its relation to ionospheric-magnetospheric convection // J. Geopys. Res. V. 94. № 12. P. 17169–17184. 1989.

- Wielgosz P., Baran L. W., Shagimuratov I.I., Aleshnikova M.V. Latitudinal variations of TEC over Europe obtained from GPS observations // Ann. Geophys. V. 22. № 1. P. 405–415. 2004.