

УДК 550.388.2

© 1994 г. А. Т. Карпачев, В. В. Афонин, Я. Шмилауэр

**ВАРИАЦИИ ПОЛОЖЕНИЯ МИНИМУМА НОЧНОГО ПРОВАЛА  
С ДОЛГОТОЙ ЗИМОЙ И В РАВНОДЕНСТВИЕ, СРАВНЕНИЕ**

На основе статистической обработки большого массива данных спутника «Космос-900» (~1300 орбит) показано, что характер долготных вариаций положения минимума главного ионосферного провала в обоих полушариях слабо изменяется при переходе от зимних условий к равноденственным. В спокойных условиях зимний провал оказывается в среднем (по всем долготам) несколько экваториальнее, а во время бури — полярнее, чем в равноденствие.

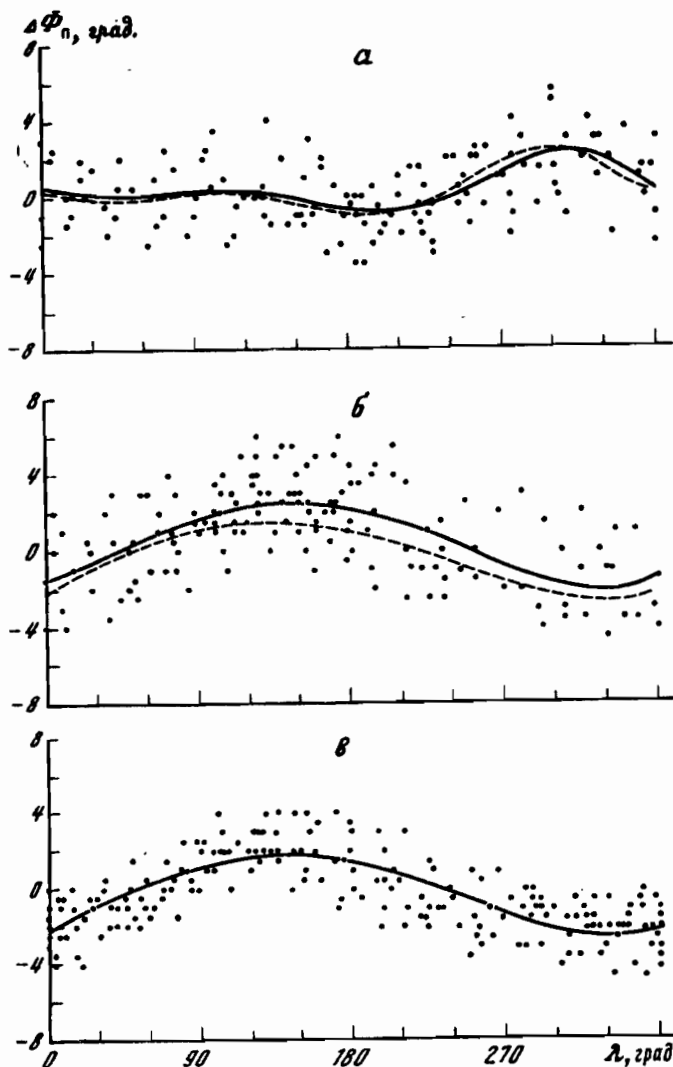
**Введение**

В работах [1, 2] выделены долготные вариации положения минимума главного ионосферного провала (ГИП) по данным спутников «Интеркосмос-19» и «Космос-900», полученным в основном для зимних условий. Было высказано предположение [3], что очень большие вариации положения минимума зимнего провала с долготой (до 11°) обусловлены большой разницей в освещенности субавроральной ионосферы сопряженных полушарий. Это приводит к сильной долготной зависимости интегральной проводимости вдоль силовой трубки и, следовательно, величины электрического поля конвекции, формирующего провал. Поскольку в равноденствие асимметрия полушарий мала, то и долготный эффект должен быть выражен слабее. С другой стороны, теоретические расчеты, проведенные в последнее время, показывают наличие больших сезонных различий в конфигурации (положении и форме) провала (см., например, [4]). Однако немногочисленные экспериментальные исследования вариаций положения минимума провала не обнаруживают существенной разницы между сезонами. Так, в работе [5] на основе статистической обработки ~15 000 орбит спутников «ISIS-1» и «Injun-5» выделены сезонные вариации положения минимума провала, которые оказались пренебрежимо малыми. Очень слабая зависимость от сезона положения минимума провала получена также по данным спутника «Ariel-3» [6].

Цель настоящей работы — выделить долготные вариации положения минимума ГИП (в обоих полушариях) для зимних и равноденственных условий и сравнить изменения характера долготного эффекта и среднего (по всем долготам) положения провала с сезоном и геомагнитной активностью.

**Исходные данные**

Данные спутника «Космос-900» получены за период высокой солнечной активности 1977—1979 гг. К равноденствию отнесены наблюдения за 1 мес до и после 22 марта или 22 сентября, а к условиям местной зимы — за 1,5 мес до и после 22 декабря или 22 июня в соответствующем полушарии. Всего для анализа отобрано 377 и 428 случаев для зимних условий, 256 и 244 случая для равноденствия в северном и южном полушариях соответственно. Орбита спутника



Вариации положения минимума ГИП с долготой (точки) в период равноденствия в северном (а) и южном (б) полушариях, представленные в виде отклонений экспериментальных данных от модели [7]:  $\Delta\Phi_n = \Phi_n^{\text{эксп}} - \Phi_n^{\text{мод}}$ . Сплошные кривые — результаты аппроксимации. Штриховые кривые на а и б — зимние условия; в — в вариациях  $\Phi_n^{\text{эксп}}$  для зимы в южном полушарии исключен постоянный коэффициент разложения Фурье

была почти круговой и за рассматриваемый период вследствие торможения снизилась с высоты  $\approx 520$  до  $\approx 320$  км, т. е. большую часть времени спутник находился выше максимума слоя F2. Данные относятся к ночным часам (18—06 LT) местного времени и рассматриваются отдельно для спокойных ( $K_p \leq 3$ ,  $\bar{K}_p \approx 2$ ) и возмущенных ( $K_p > 3$ ,  $\bar{K}_p \approx 4$ ) условий. Дискретность измерений локальной концентрации  $N_e$  была высокой (2,56 с), так что погрешность определения положения минимума провала зависела только от методики обработки данных и не превышала, как правило,  $\pm 0,5^\circ$ .

На рисунке а и б точками приведены отклонения положения минимума провала, полученные по данным спутника «Космос-900» для спокойных условий в период равноденствия, от модели [7], учитывающей зависимость от LT и  $K_p$

(за предыдущие 3 ч):  $\Delta\Phi_n = \Phi_n^{\text{эксп}} - \Phi_n^{\text{мод}}$ . Таким образом, изменения с местным временем и магнитной активностью исключаются и остаются только вариации положения провала с долготой.

Для анализа вариаций зимнего провала в спокойных условиях использованы данные работы [2], из которых были исключены данные, относящиеся к равноденствию. Поскольку полученные нами результаты и приведенные в работе [2] совпадают между собой, то на рисунке *a* и *б* приведены только аппроксимирующие кривые (штриховые).

### Методика обработки данных

Как видно из рисунка *a* и *б*, наблюдается довольно большой разброс данных: стандартное отклонение  $\sigma$  составляет 1,7 и 1,9° для равноденствия, а для зимы 1,8 и 1,8° в северном и южном полушариях соответственно. Это несколько меньше стандартного отклонения ( $\pm 2^\circ$ ), обычно получаемого при статистической обработке данных по провалу (см., например, [8]). Меньший разброс обусловлен более тщательным анализом всех случаев очень больших отклонений от медианы. Последние имеют место в периоды резких изменений  $K_p$ -индекса; в случае сильных флуктуаций  $N_s$  в днище провала; при наличии двух (старого и нового провалов) и т. д. В частности, были выделены и исключены из рассмотрения данные по второму, более экваториальному, чем ГИП, провалу, который часто наблюдается на восстановительной фазе бури в утреннем секторе вместе с ГИП и который дает очень большие отклонения от медианы. (Этот случай будет рассмотрен особо в следующих работах.)

Большой разброс данных приводит к тому, что амплитуда долготного эффекта  $A$  становится сравнимой с величиной стандартного отклонения  $\sigma$  (например, зимой в южном полушарии  $A \approx 4,2^\circ$ , а  $\sigma \approx \pm 1,8^\circ$ ). Однако это соотношение можно значительно улучшить, если устранить регулярный сдвиг данных относительно медианы. Покажем это на примере зимнего провала в южном полушарии, поскольку именно здесь получен наиболее полный (335 случаев) массив качественных данных. Из этого массива выбраны те серии данных, которые охватывают все долготы вокруг Земли (не менее 15 витков подряд за один сеанс работы спутника). Для каждой такой серии определялся постоянный коэффициент разложения Фурье, значение которого вычиталось из всех данных этой серии. Результат такой процедуры представлен на рисунке *в*. Видно, что разброс данных существенно уменьшился и при той же амплитуде долготного эффекта стандартное отклонение составляет всего 1,3°. Видно также, что на долготах вблизи 150° минимум провала всегда расположен полярнее, чем на долготе около 330°. Подобную процедуру можно продумать и для северного полушария и убедиться, что на долготах около 315° минимум провала практически всегда находится полярнее, чем на долготах около 210°. Примерно в одном-двух случаях из 10 долготные вариации минимума провала не выражены или даже проявляют обратную тенденцию (это чаще наблюдается в северном полушарии). Эти случаи относятся к периодам резких изменений  $K_p$ -индекса, когда его значение неадекватно отражает положение провала. Таким образом, долготный эффект в положении минимума провала проявляется не только в среднем, но наблюдается практически в каждом отдельном случае.

Проведенный анализ не является строгим и сделан, скорее, в целях постановки задачи. Этим методом нельзя, в частности, скорректировать единичные данные, поскольку необходимо точно знать причины, вызывающие отклонения положения минимума провала, полученного в эксперименте, от рассчитанного по модели для заданных значений  $LT$  и  $K_p$ . Иными словами, необходимо выделить другие факторы, кроме местного времени и  $K_p$ -индекса, которые также влияют на положение провала. На наш взгляд, это могут быть (включая долготный эффект) следующие факторы: ошибки в методике обработки данных, нелинейная зави-

симось  $\Phi_n$  от  $K_p$  и LT, зависимость  $\Phi_n$  от высоты (в данной работе она не учитывалась), разная реакция провала на различных фазах возмущения, изменения амплитуды и фазы нейтрального ветра, влияние  $B_z$  и  $B_y$  компонент ММП. По-видимому, только последний из перечисленных подробно проанализирован (см., например, [9]).

Таким образом, дальнейшее уменьшение разброса данных в настоящее время не представляется возможным. Поэтому, в частности, остается открытым вопрос о характере долготного эффекта над Европой, хотя он носит подобный характер для зимних и равноденственных условий и соответствует представлениям, развитым ранее по данным спутника «Интеркосмос-19» [1]. Необходимо дальнейшее развитие модели провала, учитывающей все перечисленные выше факторы.

### Обсуждение результатов

В работе [1] показано, что различие характеров долготного эффекта в разных полушариях связано с особенностями долготных изменений параметров магнитного поля Земли (величины, склонения и наклонения) в северном и южном полушариях. Не останавливаясь на этом подробно, отметим лишь, что разница в характере долготного эффекта приводит к регулярной несопряженности провалов в разных полушариях, достигающей 3—4° на долготях вблизи 315°. Этот факт имеет особое значение для равноденствия, когда провал одновременно наблюдается в обоих полушариях.

Сравним поведение провала в разные сезоны. Как видно из рисунка, долготные вариации положения минимума провала в обоих полушариях слабо изменяются по форме от сезона к сезону и находятся в пределах погрешности обработки данных. Амплитуда долготного эффекта составляет для обоих сезонов в среднем ~3,5° в северном и ~4,5° в южном полушариях. При этом в северном полушарии долготный эффект наибольший для зимы (3,5 и 3,3°), а в южном полушарии — для равноденствия (4,5 и 4,2°). Эти изменения также, по-видимому, лежат в пределах погрешности обработки данных. Таким образом, амплитуда долготного эффекта слабо зависит от сезона. Следовательно, изменение условий освещенности от сезона к сезону не столь сильно сказывается на условии формирования долготных вариаций минимума провала, как можно было бы ожидать. На наш взгляд, это довольно неожиданный результат.

В работе [2] показано, что характеристики долготного эффекта не зависят от местного времени, по крайней мере в околополуденные часы ( $24 \pm 3$  ч). Таким образом, долготные вариации положения минимума ГИП являются весьма табульной характеристикой околополуденной субавроральной ионосферы, если речь идет о некотором среднем ее состоянии.

В работе [7] рассматривалось влияние магнитной возмущенности на характер долготного эффекта. Ниже приведены результаты анализа для разных сезонов отдельно на основе статистической обработки 219 случаев в зимних условиях и 216 случаев для равноденствия при  $K_p > 3$ . Получено, что с ростом магнитной возмущенности характер долготного эффекта в обоих полушариях изменяется слабо, а его амплитуда уменьшается пропорционально  $A_0(1 - 0,1 K_p)$ , где  $A_0$  — амплитуда долготного эффекта при  $K_p = 0$ . Этот результат совпадает с выводами работы [7]. Нетрудно рассчитать, что для обоих сезонов в северном полушарии  $A_0 \approx 5^\circ$ , а в южном —  $A_0 \approx 6^\circ$ . При этом отношение  $A/\sigma$  по мере развития возмущенности практически не изменяется, поскольку с уменьшением амплитуды долготного эффекта стандартное отклонение также уменьшается (например, в южном полушарии во время равноденствия  $A \approx 3,4^\circ$ , а  $\sigma \approx 1,2^\circ$ ). Таким образом, во время сильной магнитной бури ( $K_p = 7-8$ ) долготными вариациями положения минимума ГИП в обоих полушариях для обоих сезонов можно пренебречь.

Рассмотрим теперь динамику среднего (по всем долготам) положения минимума провала. Во время магнитного возмущения в период равноденствия минимум в

среднем оказывается значительно экваториальнее по сравнению с зимой для одинаковых значений  $K_p$ -индекса: в северном полушарии на  $0,40^\circ$ , а в южном — на  $0,95^\circ$ . Из рисунка видно, что для спокойных условий ситуация обратная, т. е. провал во время равноденствия расположен полярнее, чем зимой. Напомним, что эти результаты получены (и зимой и в равноденствии) для некоторого среднего значения  $K_p \approx 2$  для спокойных и  $K_p \approx 4$  для возмущенных условий. Поэтому следует ожидать, что разница между сезонами для более широкого диапазона изменений  $K_p$ -индекса будет еще больше. Подобное поведение субаврорального пика температуры электронов  $T_e$ , связанного с минимумом провала в  $N_e$ , обнаружено по данным спутника DE-2 [10]. Авторы этой работы полагают, что плазмосфера в период равноденствия занимает чуть больший объем, чем зимой, и опускается во время бури больше, чем зимой. Заметим, однако, что ночью в равноденствие выше уровень остаточной ионизации и больше амплитуда меридиональной компоненты ветра, чем зимой [11]. В спокойных условиях оба фактора приводят к росту электронной концентрации на экваториальной стенке провала, что проявляется, при прочих равных условиях, как сдвиг провала к полюсу (см., например, [12]). Во время магнитной бури в период равноденствия более сильный, чем зимой, ветер должен приводить и к большему уменьшению электронной концентрации на экваториальной стенке провала за счет уменьшения отношения  $O/N_2$ , которое создает отрицательную фазу бури. Поэтому минимум провала окажется в равноденствие экваториальнее, чем зимой. Известно, кроме того, что имеют место сезонные вариации авроральных диффузных высыпаний, формирующих полярную стенку провала. К сожалению, они пока не систематизированы, и поэтому трудно судить об их характере.

Важно отметить, что именно увеличение амплитуды меридиональной компоненты ветра, играющей, по-видимому, большую роль в создании долготного эффекта [1], поддерживает его амплитуду на постоянном уровне зимой и в равноденствии.

### Заключение

Статистический анализ вариаций положения минимума главного ионосферного провала позволяет сделать следующие выводы:

1. Характер и амплитуда долготных вариаций околополуночного провала в обоих полушариях слабо изменяются при переходе от зимних условий к равноденственным. Следовательно, вариации освещенности сопряженных полушарий от местного времени или сезона слабо сказываются на характеристиках долготного эффекта либо компенсируются другими факторами. Таким образом модель долготного эффекта, разработанная для зимних условий [1], пригодна и для равноденствия;

2. Характер долготного эффекта слабо изменяется с ростом магнитной возмущенности, а его амплитуда уменьшается, так что во время сильных бурь долготным эффектом можно пренебречь;

3. В спокойных условиях минимум провала в равноденствие расположен в среднем (на всех долготах) несколько полярнее, а во время возмущения экваториальнее, чем зимой. Это может быть обусловлено вариациями электронной концентрации  $N_e$  на экваториальной стенке провала в зависимости от сезона и от меридиональной компоненты нейтрального ветра.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Деминов М. Г., Карпачев А. Т. Долготный эффект в конфигурации главного ионосферного провала. 1. Положение провала // Геомагнетизм и аэрономия. 1986. Т. 26. № 1. С. 63.
2. Афонин В. В., Деминов М. Г., Карпачев А. Т. и др. Долготные вариации положения главного ионосферного провала для ночных зимних условий по данным ИСЗ «Космос-900» и «Интеркосмос-19» // Геомагнетизм и аэрономия. 1992. Т. 32. № 2. С. 75.

3. Демин М. Г., Карпачев А. Т. Долготный эффект в конфигурации главного ионосферного провала. 2. Форма провала//Геоматнетизм и аэрономия. 1986. Т. 26. № 4. С. 682.
4. Sojka J. J., Schunk R. W., Raitt W. J. Seasonal variations of the high-latitude F-region for strong convection//J. Geophys. Res. 1982. V. 87. No. 1. P. 187.
5. 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. 1979. V. 84. No. 2. P. 489.
6. Tulunay Y. Global electron density distributions from the Ariel-3 satellite at mid-latitudes during quiet magnetic periods//J. Atmos. Terr. Phys. 1973. V. 35. No. 2. P. 233.
7. Демин М. Г., Карпачев А. Т., Афонин В. В., Шмилауэр Я. Изменения положения главного ионосферного провала в зависимости от долготы и геомагнитной активности//Геоматнетизм и аэрономия. 1992. Т. 32. № 5. С. 185.
8. Kohnlein W., Raitt W. J. Position of the mid-latitude trough in the topside ionosphere as deduced from ESRO-4 observations//Planet. Space Sci. 1977. V. 25. No. 5/6. P. 600.
9. Бенькова Н. П., Беспрозванная А. С., Козлов Е. Ф. и др. Влияние ММП на положение главного ионосферного провала по данным ИСЗ «Интеркосмос-19»//Геоматнетизм и аэрономия. 1989. Т. 29. № 5. С. 863.
10. Fok M.-C., Kozura J. U., Warren M. F., Brace L. H. Seasonal variations in the subauroral electron temperature enhancement//J. Geophys. Res. 1991. V. 96. No. 6. P. 9773.
11. Гинзбург Э. И., Гуляев В. Т., Жалковская Л. В. Динамические модели свободной атмосферы. Новосибирск: Наука, 1987. 292 с.
12. Чернышев В. И., Заболоцкий М. С. Реакция высокоширотной ионосферы на изменение термосферного ветра в возмущенных условиях//Геоматнетизм и аэрономия. 1989. Т. 29. № 6. С. 1025.

Институт земного магнетизма,  
ионосферы и распространения  
радиоволн

Поступила в редакцию  
11.03.93

Институт космических исследований  
Геофизический институт АНЧР (Прага)