

4. Полученные результаты могут быть использованы в краткосрочном прогнозировании, а также для уточнения физических механизмов особенностей суточных вариаций электронной концентрации области F2 ионосферы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Серебряков Б.Е.* // Геомагнетизм и аэрономия. 1983. Т. 23. С. 332.
2. *Медникова Н.В.* // Физика солнечных корпускулярных потоков и их воздействие на верхнюю атмосферу Земли. М.: Наука, 1957. С. 183.
3. *Захаров И.Г., Тырнов О.Ф.* // Геомагнетизм и аэрономия. 1988. Т. 25. С. 850.
4. *Лихачев М.А., Васильева Ф.А.* // Электродинамика и распространение радиоволн. Томск, 1987. № 6. С. 275.
5. *Альперт Я.Л.* Распространение электромагнитных волн и ионосфера. М.: Наука, 1972. С. 563.

Харьковский государственный университет

Поступила в редакцию
11.03.91
После доработки
12.02.92

ГА, Г-32, 1992

УДК 550.388.2:550.386

© 1992 г. М.Г. Деминов, А.Т. Карпачев, В.В. Афонин,
Я. Шмиллауэр

ИЗМЕНЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ГЛАВНОГО ИОНОСФЕРНОГО ПРОВАЛА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ДОЛГОТЫ И ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ

На основе анализа данных ИСЗ "Космос-900" и "Интеркосмос-19" о положении минимума электронной концентрации главного ионосферного провала Φ_{Π} для ночных зимних условий обнаружено, что характер долготных изменений положения провала слабо зависит от уровня магнитной активности, а амплитуда этих изменений уменьшается с ростом магнитной активности. Представлена аналитическая зависимость (модель) Φ_{Π} от местного времени, долготы, высоты и уровня магнитной активности, которая в линейном приближении отражает основные закономерности изменений Φ_{Π} , выделенные по данным ИСЗ "Интеркосмос-19" и "Космос-900", и не противоречит полученным ранее результатам.

Введение. Исследования главного ионосферного провала (ГИП) позволили установить, что инвариантная широта Φ_{Π} , на которой расположен минимум электронной концентрации ГИП, зависит от местного времени t , отсчитываемого от полуночи и от K_p -индекса (см., например, [1, 2]). Кроме того, на основе анализа большого массива данных ИСЗ "Космос-900" и "Интеркосмос-19" была дополнительно выделена зависимость Φ_{Π} от географической долготы λ для относительно спокойных условий ($\bar{K}_p = 2$) [3]. Вопрос о зависимости характеристик долготных изменений Φ_{Π} от уровня магнитной активности оставался открытым. Данная работа посвящена приближенному решению этой задачи на основе данных измерений электронной концентрации с ИСЗ "Космос-900" и "Интеркосмос-19".

Используемые данные. Для анализа были использованы данные о положении минимума ГИП на высоте максимума F2-слоя h_m , которое определялось по критической частоте F2-слоя с помощью станции внешнего зондирования на ИСЗ "Интеркосмос-19" и данных о положении минимума ГИП на почти фиксированной (для каждого сеанса измерений) вместе $h_o > h_m$, которое определялось по электронной концентрации с помощью трехэлектродной ионной ловушки с плавающим потенциалом на ИСЗ "Космос-900". Данные, использованные для анализа, относятся в основном к интервалу 20±04LT местной зимы для периода высокой солнечной активности 1978–1980 гг. Для этих условий среднее значение $h_o = 460$ и 410 км в области ГИП северного и южного полушарий соответственно, что связано с постепенным уменьшением высоты ИСЗ "Космос-900" от зимы 1978/79 гг. (использованы данные для северного полушария) к лету 1979 г. (использованы данные для южного полушария). Среднее значение $h_m \approx 350$ км. Не всегда форма ГИП позволяла однозначно определить Φ_{Π} . Для широкого и плоского днища ГИП значение Φ_{Π} определялось по середине днища; при наличии флуктуаций электронной концентрации в области ГИП значение Φ_{Π} определялось по наименьшей величине электронной концентрации в этой об-

ласти. Анализ данных ИСЗ "Интеркосмос-19" дополнительно затруднен наличием F -рассеяния и большей, чем у "Космос-900", дискретностью данных, поэтому при получении зависимости Φ_{Π} от K_p предпочтение отдавалось данным ИСЗ "Космос-900". При получении приведенных ниже уравнений регрессии для Φ_{Π} использован массив данных Φ_{Π} для каждого полушария примерно из 120 значений, полученных с помощью ИСЗ "Интеркосмос-19" для $0 \leq K_p \leq 4$, и 420 значений, полученных с помощью ИСЗ "Космос-900" для $0 \leq K_p \leq 8$, из которых около трети значений соответствовало периоду бури в геомагнитном поле. Все уравнения регрессии для Φ_{Π} имеют стандартное отклонение около $2^\circ \Phi$, поэтому для краткости записи это отклонение не приводится.

Результаты наблюдений. Предположим, что для рассматриваемых условий зависимость Φ_{Π} от K_p , t , λ и h можно представить в виде:

$$\Phi_{\Pi} = \Phi_{\Pi 0} - BK_p - 0,5t - \Delta\Phi_{\Pi}(h, \lambda), \quad (1)$$

$$\Delta\Phi_{\Pi}(h, \lambda) = A\Phi_{\Pi}(\lambda) + 2[1 + A\Phi_{\Pi}(\lambda)] \exp[(h_m - h)/H], \quad (2)$$

$$\Phi_{\Pi}^N(\lambda) = 0,5[\cos(2\lambda - 50) - \cos(\lambda + 40)], \quad (3)$$

$$\Phi_{\Pi}^S(\lambda) = \cos(\lambda + 30),$$

где $h \geq h_m$, $h_m = 350$ км, $H = 200$ км, индексы N и S соответствуют $\Phi_{\Pi}(\lambda)$ для северного и южного полушарий соответственно. Здесь и ниже Φ_{Π} и λ – в градусах, t – в часах, h – в км. При $\Phi_{\Pi 0} = 65,2$, $B = 2,1$ и $\Delta\Phi_{\Pi}(h, \lambda) = 0$ соотношение (1) совпадает с приведенным в [1]. При $\Phi_{\Pi 0} = 65,2$, $B = 2,1$ и $A = 0,8$ соотношения (2) и (3) являются упрощенной аппроксимацией приведенных в [3] результатов, которые основаны на данных ИСЗ "Космос-900" и "Интеркосмос-19" для относительно спокойных условий ($\bar{K}_p = 2$).

При записи соотношений (2) и (3) предполагается, что $\Phi_{\Pi}(\lambda)$ не зависит от K_p , т.е. характер долготных изменений положения минимума главного ионосферного провала сохраняется при переходе от спокойных к возмущенным условиям. Для проверки этого предположения используем относящиеся к южному полушарию данные ИСЗ "Космос-900", для которых $h = h_0 \approx 410$ км. Примем $\Phi_{\Pi 0} = 65,2$ и $B = 2,1$ в соответствии с [1] и с помощью соотношения (1) по измеренным $\Phi_{\Pi}(h_0)$ определим $\Delta\Phi_{\Pi}(h_0, \lambda)$. Распределим полученные таким способом значения $\Delta\Phi_{\Pi}(h_0, \lambda)$ на две группы, которые соответствуют относительно спокойным и возмущенным условиям: около 200 значений при $0 \leq K_p \leq 3$, для которых медиана $\bar{K}_p = 2$, и около 100 значений при $3 < K_p < 6$, для которых медиана $\bar{K}_p = 4$. Статистическая обработка этих групп данных приводит к уравнениям регрессии

$$\Delta\Phi_{\Pi}^S(h_0, \lambda, \bar{K}_p = 2) = 1,1 + 2,1\cos(\lambda + 42), \quad (4)$$

$$\Delta\Phi_{\Pi}^S(h_0, \lambda, \bar{K}_p = 4) = 2,4 + 1,6\cos(\lambda + 34).$$

Видно, что характер долготных вариаций сохраняется при изменении уровня магнитной активности, что и было предположено при записи соотношений (2), (3). Из уравнений (4) следует также, что амплитуда долготных изменений, которая в соотношении (2) пропорциональна коэффициенту A , уменьшается с ростом уровня магнитной активности. Из сравнения коэффициента A в соотношении (2) от K_p -индекса:

$$A = 1 - 0,1K_p. \quad (5)$$

Из соотношений (2), (5) следует, что на $h = h_m$ амплитуда долготных изменений равна $3(1 - 0,1K_p) \pm 2^\circ$, где учтено стандартное отклонение. Этот результат не противоречит данным ИСЗ "Интеркосмос-19" для $h = h_m$. Так, для очень спокойных условий долготные изменения $\Phi_{\Pi}(h_m)$ могут иметь амплитуду вплоть до $5^\circ \Phi$ для отдельных сеансов наблюдений [4]. При высокой магнитной активности ($K_p > 6$) в период интенсивной бури 3–4 апреля 1979 г. долготные изменения $\Phi_{\Pi}(h_m)$ не были зафиксированы [5], что также указывает на уменьшение амплитуды долготных изменений $\Phi_{\Pi}(h_m)$ с ростом уровня магнитной активности.

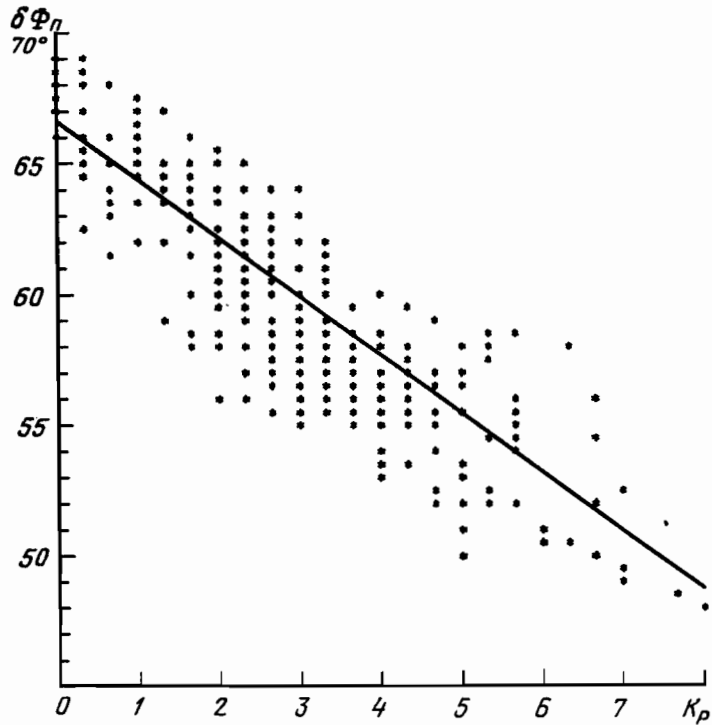
Уточним значения $\Phi_{\Pi 0}$ и B в соотношении (1). Для этого с помощью соотношений (1)–(3) и (5) по измеренным $\Phi_{\Pi}(h_0)$ определим величину

$$\delta\Phi_{\Pi} = \Phi_{\Pi}(h_0) + 0,5t + \Delta\Phi_{\Pi}(h_0, \lambda), \quad (6)$$

которая, по предположению, равна $\Phi_{\Pi 0} - BK_p$. Для определенности воспользуемся данными $\Phi_{\Pi}(h_0)$ для северного полушария, где $h_0 = 460$ км. Для уменьшения ошибок, связанных с неточностью задания коэффициента при местном времени t , выделим данные, которые соответствуют $-3 \leq t \leq 3$. Полученные таким способом значения $\delta\Phi_{\Pi}$ при всех наблюдаемых значениях K_p -индекса приведены на рисунке. Сплошная линия на этом рисунке является линейной аппроксимацией связи $\delta\Phi_{\Pi}$ с K_p : $\delta\Phi_{\Pi} = 66,5 - 2,2K_p$. Следовательно, в соотношении (1) приближенно

$$\Phi_{\Pi 0} = 66,5, \quad B = 2,2. \quad (7)$$

Несмотря на некоторое отличие равенств (7) от использованных выше значений $\Phi_{\Pi 0} = 65,2$ и $B = 2,1$ по модели [1], разница в определении $\delta\Phi_{\Pi} = \Phi_{\Pi 0} - BK_p$ по этим двум вариантам не превы-



Зависимость модифицированного по уравнению (6) положения минимума главного ионосферного провала $\delta\Phi_{\Pi}$ от K_p -индекса по данным ИСЗ "Космос-900" для северного полушария (точки) и линейная аппроксимация этой зависимости (сплошная линия)

шает стандартного отклонения $2^\circ\Phi$ во всем диапазоне возможных значений K_p -индекса. Отметим, что соотношение (1) с учетом (2), (3), (5) и (7) не противоречит зависимостям $\Phi_{\Pi}(h_m)$ от K_p , полученных с помощью наземных ионосферных станций. Например, по данным этих станций, расположенных в северном полушарии вблизи $\lambda = 130^\circ$, для околополуночных часов $\Phi_{\Pi}(h_m) = 64 - 2K_p$ [2]. Для тех же условий с помощью соотношений (1)–(3), (5), (7) получим результат $\Phi_{\Pi}(h_m) = 64,3 - 2,18K_p$, который отличается от приведенного в [2] не более чем на $1,3^\circ\Phi$ во всем диапазоне возможных значений K_p .

Соотношение (1) с учетом (2), (3), (5), (7) ниже называется аналитической моделью положения минимума электронной концентрации главного ионосферного провала Φ_{Π} в линейном приближении, поскольку при фиксированных λ и h зависимость Φ_{Π} от K_p и t по этой модели является линейной. Данная модель отражает основные закономерности изменений Φ_{Π} , которые были выделены из анализа данных ИСЗ "Интеркосмос-19" и "Космос-900" и не противоречит полученным ранее результатам.

Обсуждение. Рассмотрим некоторые следствия аналитической модели Φ_{Π} в линейном приближении применительно к околополуночным часам.

1. Выше примерно 1000 км положение минимума электронной концентрации главного ионосферного провала

$$\Phi_{\Pi} = 66,5 - 2,2K_p - (1 - 0,1K_p)\Phi_{\Pi}(\lambda) \quad (8)$$

не зависит от высоты и примыкает к экваториальной границе диффузных высываний авроральных электронов Φ_r , если для определения Φ_r использовать линейную интерполяцию модели [6] или результат работы [7] для интервала $-1 \leq t \leq 1$: $\Phi_r = 67 - 2K_p$. По-видимому, слабые долготные изменения Φ_{Π} на этих высотах обеспечиваются аналогичными долготными изменениями Φ_r , которые не были выделены в [6, 7], поскольку амплитуда этих изменений не превышает стандартного отклонения $2^\circ\Phi$ для Φ_r .

2. Зависимость Φ_{Π} от K_p различна на разных долготах. Эта разница максимальна вблизи $h = h_m$:

$$\Phi_{\Pi}(h_m) = a(\lambda) - b(\lambda)K_p \quad (9)$$

где $a(\lambda) = 64,5 - 3\Phi_{\Pi}(\lambda)$, $b(\lambda) = 2,2 - 0,3\Phi_{\Pi}(\lambda)$. Например, для южного полушария $\Phi_{\Pi}(h_m) =$

$= 61,5 - 1,9K_p$ и $\Phi_{\Pi}(h_m) = 67,5 - 2,5K_p$ на географических долготах 320 и 140°, где $\Phi_{\Pi}(\lambda) = 1$ и -1 соответственно.

3. При низкой магнитной активности на долготах, где $\Phi_{\Pi}(\lambda) \approx -1$, изменение Φ_{Π} с высотой практически отсутствует во всем интервале $h > h_m$ на долготах, где $\Phi_{\Pi}(\lambda) \approx 1$, изменение Φ_{Π} с высотой максимально (оно наиболее значительно в интервале $h_m < h < h_m + H$) и разница между $\Phi_{\Pi}(h_m)$ и $\Phi_{\Pi}(h > 1000 \text{ км})$ достигает $4^\circ \Phi$ при $K_p = 0$ на этих долготах. С ростом магнитной активности зависимость этой разницы от долготы уменьшается и при высокой магнитной активности $\Phi_{\Pi}(h > 1000 \text{ км}) - \Phi_{\Pi}(h_m) \approx 2^\circ \Phi$ практически независимо от долготы.

Завершая обсуждение, отметим, что данная модель является приближенной и значения коэффициентов модели требуют уточнения даже в линейном приближении. Это видно и из разброса данных на рисунке.

Выводы. На основе анализа положения минимума электронной концентрации главного ионосферного провала Φ_{Π} для ночных зимних условий по данным ИСЗ "Интеркосмос-19" и "Космос-900":

1) обнаружено, что характер долготных изменений Φ_{Π} слабо зависит от уровня магнитной активности, а амплитуда этих изменений уменьшается с ростом магнитной активности. Поэтому зависимость Φ_{Π} от K_p для околополуночных часов оказывается различной на разных долготах;

2) получено, что в околополуночные часы выше примерно 1000 км Φ_{Π} примыкает к экваториальной границе диффузных высыпаний авроральных электронов практически при любом уровне магнитной активности;

3) представлена аналитическая зависимость (модель) Φ_{Π} от местного времени, долготы, высоты и уровня магнитной активности, которая в линейном приближении отражает основные закономерности изменений Φ_{Π} , выделенные по данным ИСЗ, и не противоречит полученным ранее результатам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Köhnlein 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. № 516. P. 600–602.
2. Бенькова Н.П., Зикрач Э.К. Главный ионосферный провал по наблюдениям в Якутском регионе // Физические процессы в области главного ионосферного провала. Прага: ГФИ ЧСАН, 1963. С. 7–18.
3. 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.
4. Деминов М.Г., Карпачев А.Т. Долготный эффект в конфигурации главного ионосферного провала. I. Положение провала // Геомагнетизм и аэрономия. 1986. Т. 26. № 1. С. 63–68.
5. Деминов М.Г., Карпачев А.Т., Кушнеровский Ю.В., Шмилауэр Я. Структура субавроральной ионосферы в период магнитной бури по данным ИСЗ "Интеркосмос-19" // Геомагнетизм и аэрономия. 1985. Т. 25. № 3. С. 406–410.
6. Вальчук Т.Е., Гальперин Ю.И., Николаенко Л.М. и др. Диффузная авроральная зона. VIII. Экваториальная граница зоны диффузного высыпания авроральных электронов в утреннем секторе // Космич. исслед. 1986. Т. 24. № 6. С. 875–883.
7. Gussenhoven M.S., Hardy D.A., Heinemann N. Systematics of the equatorward diffusive auroral boundary // J. Geophys. Res. 1983. V. 88. № A7. P. 5692–5708.

Институт земного магнетизма, ионосферы
и распространения радиоволн РАН
Институт космических исследований РАН
Геофизический институт ЧСАН

Поступила в редакцию
04.02.92
После доработки
02.03.92

УДК 551.510.534

© 1992 г. А.М. Звягинцев, А.А. Староватов, А.Д. Данилов

ВЫСОТНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОЗОНА НАД ПАМИРОМ

Сопоставление наземных наблюдений общего количества озона в регионе Средней Азии с измерением высотного профиля O_3 с помощью озонзондов подтверждает сделанный ранее вывод об уменьшении $N(O_3)$ над Памиром и о связи этого уменьшения с динамическими процессами.