

есть English version

УДК 550.338.2

© 1998 г. А.Т. Карпачев, В.В. Афонин

**ЗАВИСИМОСТЬ ВЕРОЯТНОСТИ НАБЛЮДЕНИЯ ИОНОСФЕРНЫХ
ПРОВАЛОВ ОТ СЕЗОНА, МЕСТНОГО ВРЕМЕНИ, ДОЛГОТЫ
И УРОВНЯ МАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ**

Проведен статистический анализ вероятности наблюдения разных ионосферных провалов на большом однородном массиве данных спутника "Космос-900" (около 3000 витков). Выделены и исследованы вариации вероятности появления провалов с сезоном, местным временем и уровнем магнитной активности. Выявлен долготный эффект (УТ-контроль) в вероятности наблюдения провалов для зимних дневных и летних ночных условий в северном и южном полушариях. Показано, что вероятность образования провала в этих условиях зависит от уровня магнитной активности и величины фоновой концентрации, которая определяется, в основном, изменениями условий освещенности и нейтральным ветром. Проведено сравнение с другими данными, выявлены причины расхождений.

Введение

Хорошо известно, что вероятность P наблюдения среднеширотного (или главного или субаврорального) ионосферного провала зависит от сезона, местного времени и уровня магнитной активности. Эта зависимость часто выражается простой качественной формулой: P больше всего зимой, ночью и растет с ростом магнитной активности. При этом в зимних околополуночных условиях провал во всех экспериментах наблюдается почти всегда. Для других условий немногочисленные и неполные статистические исследования величины P [1–6] дают сильно различающиеся результаты (см., например, [1] и [3]). Это, по-видимому, связано с тем, что анализ проводился разными методами и на ограниченных массивах данных, характеризующихся невысоким пространственным и временным разрешением и полученных на разных высотах и долготах обоих полушарий. В последнее время было также показано, что и в ночных и в дневных условиях на близких широтах может существовать несколько типов провалов с различными характеристиками [7, 8]. При этом наблюдаемая картина сильно зависит от полушария и долготы (УТ-времени). Данная работа представляет собой детальный анализ вероятности наблюдения разных ионосферных провалов на основе большого однородного массива данных спутника "Космос-900" и с учетом недавно обнаруженных закономерностей.

Исходные данные

Для статистического анализа характеристик ионосферных провалов было использовано ~3000 пролетов спутника "Космос-900" над субавроральной ионосферой обоих полушарий, более или менее равномерно распределенных по всем долготам. Данные получены для средней и высокой солнечной активности за период 1977–1979 гг. За это время почти круговая орбита спутника вследствие торможения снизилась с ~550

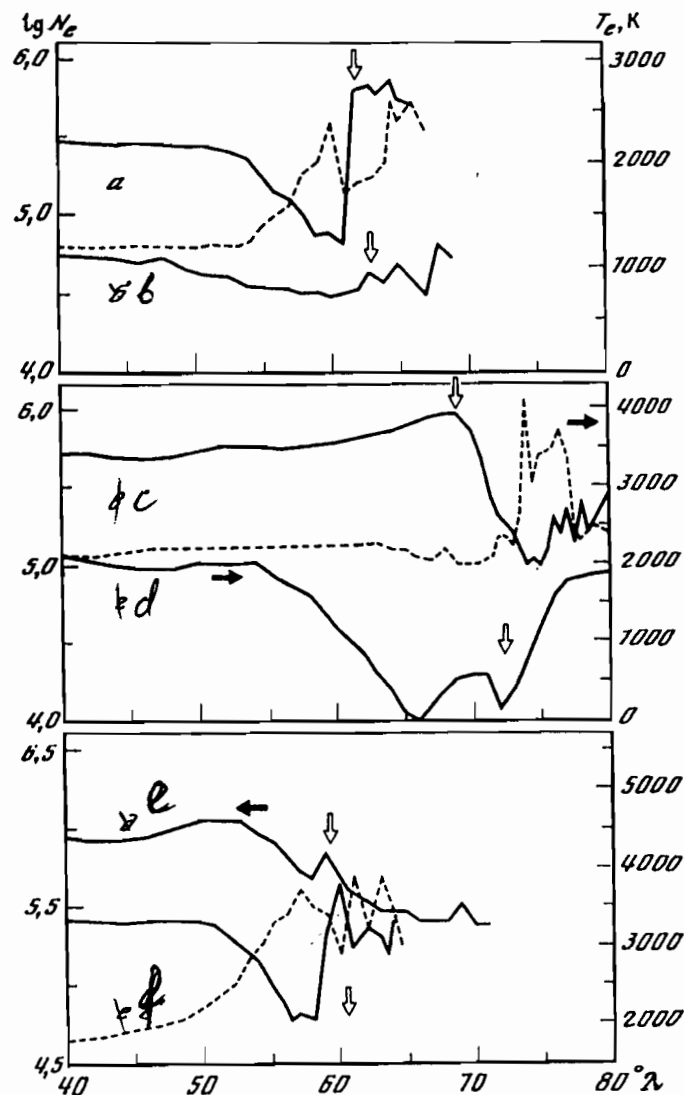


Рис. 1. Примеры четко выраженного провала (*a, в, г, е*) и квазипровала (*б, д*) в ночных зимних (*a, б*), дневных зимних (*в, г*) и летних ночных (*д, е*) условиях. Сплошными кривыми приведены широтные вариации N_e ; штриховыми — T_e . Светлой стрелкой показана граница авроральных диффузных высыпаний по модели [9], темная стрелка на широте терминатора указывает на неосвещенную ионосферу. Условия наблюдений приведены в таблице

до ~350 км. Это близко к высоте максимума слоя F_2 , которая по данным спутника "Интеркосмос-19" для этих же условий изменяется в интервале 300–450 км. Измерения локальной концентрации N_e и температуры T_e плазмы проводились с разрешением по времени ≤ 1 с, поэтому точность распознавания провала как структуры определялась только самой методикой его выделения. Провал как структура субавроральной ионосферы выделялся по вариациям концентрации и температуры электронов по следующим критериям: 1) наличие четко определяемого минимума N_e вблизи экваториальной границы аврорального овала, которому практически всегда соответствует максимум T_e ; 2) наличие достаточно хорошо выраженной экваториальной стенки провала; 3) наличие крутой и сильно неоднородной полярной стенки провала, с которой обычно связано резкое повышение T_e с такой же неоднородной структурой; 4) повторяемость выделенной структуры от витка к витку, т.е. достаточно большая долготная протяженность исследуемой структуры. Точность определения экваториальной границы аврорального овала, полученной в модели [9] по данным о диффузных высыпаниях низкоэнергичных электронов, при этом не

Данные витков спутника "Космос-900", представленных на рис. 1

Номер кривой	Номер витка	Дата	Время UT	Время MLT	λ , град	h , км	K_p	Полушарие
a	13023	25.07.79	09.13	0.9	220	385	2-	S
b	13095	30.07.79	23.22	22.1	4	390	2-	N
17. a	10098	18.01.79	17.11	12.0	290	403	3	N
z	12607	28.06.79	16.24	12.0	290	390	1-	S
13. d	10179	24.01.79	09.31	1.2	215	480	3	S
e	10296	31.01.79	23.42	21.5	355	487	3-	S

играет существенной роли, поскольку на первом этапе исследований даже далеко отстоящие от этой границы провалы принимались в расчет. При таком отборе среди них оказывается не только главный ионосферный провал (ГИП), но и кольцевой ионосферный провал (КИП), связанный на восстановительной фазе бури с кольцевым магнитосферным током [7], провал Малдрью, связанный с дневным каспом [8] и высокоширотный провал, который наблюдается все сутки внутри аврорального овала и характеризуется крайне неоднородной структурой даже в области экваториальной стенки [10]. На втором этапе все другие провалы, кроме ГИП, исключались из анализа, или рассматривались отдельно, как в случае с дневным провалом Малдрью.

На рис. 1а показан пример ярко выраженного провала, который наблюдался в зимних ночных условиях и который полностью соответствует сформулированным выше критериям. (Параметры всех приведенных на рис. 1 витков даны в таблице.) Для сравнения на рис. 1б приведена структура, которая также наблюдалась в зимних ночных условиях, но у которой слабо выражены все элементы, чтобы можно было уверенно определить ее как провал. Однако на соседних витках на рассматриваемых широтах были зарегистрированы четко выраженные провалы, с минимумом концентрации, положение которого достаточно точно соответствует рассматриваемым условиям. Такие случаи "вырожденного", или "квазипровала" также будут учитываться ниже, поскольку они, фактически, определяют точность применяемой методики распознавания провала, а, следовательно, и точность проведенного статистического анализа. Отметим, что в обоих случаях минимуму N_c в области провала соответствует четко выраженный пик T_c (для простоты пик T_c на рис. 1б не приводится).

Зависимость вероятности наблюдения зимнего ионосферного провала от местного времени

Летом провал наблюдается только в околополуночные часы [2]. В зимних и равноденственных условиях он часто регистрируется ночью и гораздо реже днем [1-5]. Для количественного исследования зависимости вероятности наблюдения провала (P) от местного магнитного времени было использовано 1478 случаев вблизи ($\pm 1,5$ мес) декабрьского солнцестояния в северном полушарии и июньского - в южном. Поскольку в очень спокойных и возмущенных условиях поведение провала имеет свою специфику, были отобраны данные в интервале K_p от 1- до 3+. Результаты анализа в рамках заданных выше критериев приведены на рис. 2. Видно, что вероятность появления провала резко возрастает после захода Солнца, достигая ~100% в послеполуночные часы, и также резко падает после восхода Солнца вплоть до ~30% в послеполуденные часы. И, наоборот, квазипровалы чаще наблюдаются в дневные часы ($P = 15-20\%$), где провал плохо выражен и реже в ночные часы ($P = 3-5\%$), где провал почти всегда фиксируется четко. Таким образом, число квазипровалов может служить мерой степени развитости провала в течение суток, а восход и заход Солнца определяют резкую грань между ночным и дневным провалом.

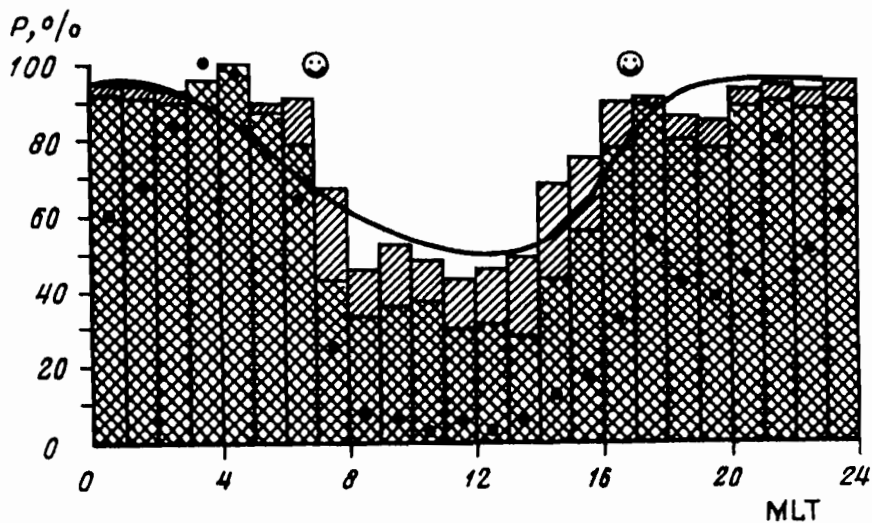


Рис. 2. Зависимость вероятности P наблюдения провала от местного магнитного времени для зимних спокойных ($K_p = 1-3+$) условий. Темная штриховка — четко выраженный провал, светлая — квазипровал, черные кружки — данные спутников "Ariel-3" [1], сплошная кривая — "ISIS-1" и "Injun-5" [3]; светлые кружки — восход и заход Солнца

Это достаточно известный факт, однако детальный анализ суточных вариаций вероятности наблюдения провала не проводился. Проведем такой анализ для зимних условий в сравнении с наиболее репрезентативными данными спутников "Ariel-3" [1], а также "ISIS-1" и "Injun-5" [3] — рис. 2.

Данные спутников "ISIS-1" и "Injun-5" получены на высотах $h < 1500$ км, а данные спутника "Ariel-3" — на 500–650 км, что ближе к высотам спутника "Космос-900". Тем не менее по абсолютным значениям, как видно из рис. 2, первые гораздо лучше, чем вторые, согласуются с данными спутника "Космос-900". С другой стороны, данные спутника "Ariel-3" менее сглажены, и их относительные вариации четко подтверждают существование резкой границы между дневными и ночными условиями. Кроме того, они показывают наличие вечернего и утреннего пика в распределении вероятности, на которые ранее, по-видимому, не обращали внимание. Однако вечерний и утренний пики величины P выделяются также по данным спутника "АЕ-С" [2] — в 16–18 MLT и 2–4 MLT, соответственно, и по данным спутников серии "Транзит" по полному содержанию электронов над Скандинавией [5] — в ~ 17 LT и 2–5 LT соответственно. Исследования степени развитости (глубины и ширины) провала от местного времени дают весьма противоречивые результаты, но чаще всего речь также идет о ранних вечерних и ранних утренних часах (см., например, [6]). Таким образом, можно говорить об устойчивом поведении зимнего провала в неосвещенное время суток. Наиболее простое объяснение такому поведению зимнего провала дано в работе [11]. В ней рассмотрен застойный механизм образования провала на основе эффекта "полной тени": в серповидной области между терминатором и экваториальной границей аврорального овала зимой все сутки нет никаких источников ионизации — ни солнечной, ни корпускулярной. Размеры этой области меняются при вращении Земли, поскольку магнитный и географический полюса не совпадают, а экваториальная граница авроральных диффузных высыпаний наиболее точно моделируется кругом, центр которого сдвинут от магнитного полюса на $\sim 5^\circ$ в ночной сектор. Поскольку самый узкий серп наблюдается в околополуденные часы, постольку и провал в это время менее развит, чем вечером и утром. Однако в таком случае утренний пик величины P должен достигаться ближе к восходу, а не в 3–5 LT, как свидетельствуют все наблюдения. По-видимому, существуют еще какие-то механизмы в этом секторе местного времени, приводящие к более сильно развитому провалу. Возможно, это нейтральный ветер, максимальная скорость которого к

экватору обычно достигается после полуночи, и который переносит возбужденные молекулы N_2^* из аврорального овала в минимум провала, вызывая дополнительное уменьшение N_e [12]. Возможно также действие втекающего в утреннем секторе продольного тока [13], который, как известно, на уровне ионосферы вызывает сильное истощение N_e [14]. Наиболее сильно развитый кольцевой провал (КИП), связанный на восстановительной фазе бури с остаточным кольцевым ионосферным током, также, в основном, наблюдается в утренние часы [7]. Наличие КИП может увеличить общую вероятность наблюдения провала в этом секторе местного времени, поскольку КИП зачастую трудно отличить от ГИП и поскольку в массиве данных спутника "Космос-900" бури занимают значительную часть времени. Отметим, что наиболее трудно разделить КИП и ГИП в диапазоне $K_p = 3-4$. На более поздней стадии восстановления экваториальная граница авроральных диффузных высыпаний и вместе с ней ГИП уходят на более высокие широты ($64-66^\circ$), а КИП остается на широтах остаточного кольцевого тока ($55-57^\circ$), что на $\sim 10^\circ$ экваториальнее аврорального овала, следовательно, первый критерий для КИП нарушается, и он исключается из анализа.

Резкое увеличение вероятности P после захода солнца ($t \geq 18$ LT) связано с началом действия механизма стагнации в области, где скорость вращения Земли и скорость дрейфа на экваториальном краю вечерней ячейки конвекции взаимно компенсируются [15]. Однако сформировавшийся вечером провал существует всю ночь, и величина P должна постепенно уменьшаться к утру, не образуя вечернего пика. Таким образом, вечерний пик P также, по-видимому, связан с некоторыми дополнительными причинами. В частности, с образованием в вечернем секторе местного времени "поляризационного джета" – узкой полосы быстрого дрейфа на запад, с которым связан очень узкий и глубокий провал (см., например, [16]). Поляризационный джет образуется во время суббури, которые довольно часто попадают в заданный выше интервал $K_p = 1-3+$. Кроме того, провал, образовавшийся во время суббури, существует затем продолжительное время. Напомним также, что в области застоя, минимум провала образуется не вдоль самой линии стагнации, где дрейф равен нулю, а несколько полярнее, т.е. в полосе дрейфа, направленного на запад [15, 17]. Следовательно, из области стагнации обедненная ионизация будет выноситься не только в ночной, но и в дневной сектор [18]. Данные спутника "Космос-900" подтверждают это предположение [8]. Таким образом, область стагнации является источником ночного и частично дневного провала, поэтому вероятность наблюдения провала здесь будет выше, чем в другое время.

Детальный анализ данных спутника "Космос-900" показывает, что в дневное время действительно существует два провала [8]. Один из них связан с упоминавшимся выше механизмом полной тени и по своим характеристикам очень похож на ночной ГИП, образуя с ним на неосвещенных Солнцем долготах единую ветвь, расположенную вблизи, но экваториальнее аврорального овала. Пример дневного ГИП приведен на рис. 1г. Второй провал, как указано выше, выносится западным дрейфом из области стагнации и поддерживается в околополуденные часы сильными электрическими полями и продольными токами [8]. Этот провал существует, в основном, на освещенных Солнцем долготах и имеет характерную форму с очень крутой экваториальной стенкой и плохо выраженной полярной – рис. 1в. Четко выраженному минимуму N_e в этом провале обычно соответствует и четко оформленный пик T_e . В околополуденные часы этот провал, как правило, находится внутри аврорального овала, но экваториальнее дневного каспа и близок в это время по положению к провалу, который был впервые обнаружен Малдрью по данным спутника "Alouette-1" [19]. Поэтому он был назван "провалом Малдрью". Поскольку провал Малдрью существует, в основном, на освещенных Солнцем долготах, а дневной ГИП – на долготах тени, то это приводит к сильному долготному эффекту (или UT-контролю) в величине P . При этом для провала Малдрью величина P вблизи полудня будет

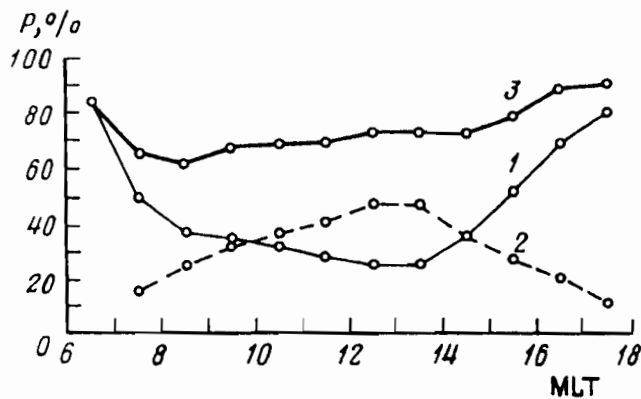


Рис. 3

Рис. 3. Вариации вероятности P наблюдения разных провалов с местным магнитным временем для зимних спокойных ($K_p = 1-3+$) условий (усредненные по всем долготам обоих полушарий): 1 – дневной ГИП; 2 – провал Малдрью; 3 – суммарная вероятность

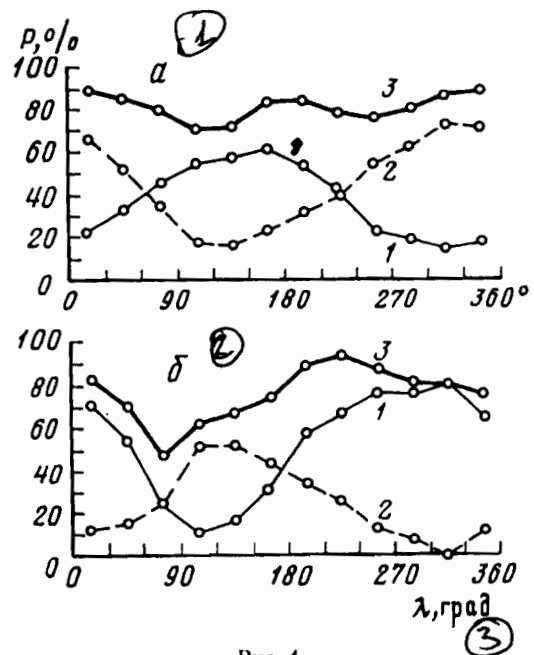


Рис. 4

Рис. 4. Вариации вероятности P наблюдения зимних провалов с долготой в северном (а) и южном (б) полушариях: 1 – дневной ГИП; 2 – провал Малдрью; 3 – суммарная вероятность. $K_p = 1-3+$

максимальна, а для дневного ГИП – минимальна [8]. Количественное представление сказанного приведено на рис. 3 и рис. 4.

Вариации величины P несколько отличаются в разных полушариях, но для простоты на рис. 3 приведена средняя для обоих полушарий картина, полученная с использованием 670 случаев. Как видно из рис. 3, провал Малдрью появляется в 17–18 LT, чаще всего наблюдается в послеполуденные часы и исчезает в 7–8 LT, где он выражен гораздо хуже, чем вечером. Дневной ГИП, наоборот, реже всего наблюдается после полудня. Вероятность наблюдения обоих провалов (без разделения на типы) минимальна утром и составляет ~70% в околополуденные часы местного времени.

Обнаруженные закономерности позволяют понять причины сильных расхождений между разными данными, представленными на рис. 2. Отбор данных спутника "Ariel-3" проводился с помощью ЭВМ и был ограничен географической широтой 70° , поэтому большинство околополуденных провалов, которые при низкой магнитной активности расположены в полосе геомагнитных широт $65-80^\circ$, было автоматически исключено из анализа. Это резко уменьшило величину P для дневных часов – рис. 2. Спутники "ISIS-1" и "Injun-5" имели достаточно большое наклонение орбиты для наблюдения околополуденных провалов, но авторам работы [3] не удалось провести разделение на два провала для высот $h < 1500$ км, поэтому на их графике для дневных часов представлена, очевидно, суммарная кривая для обоих провалов. Наконец, данные спутника "Космос-900" на рис. 2 в силу заданных на первом этапе критериев отбора представляют, в основном, главный ионосферный провал. Следовательно, для того, чтобы проанализировать оба дневных провала – дневной ГИП и провал Малдрью по отдельности, надо несколько уточнить первый критерий отбора. Отметим также, что первому критерию отбора формально соответствует и так называемый высокоширотный провал. Однако он все сутки наблюдается внутри аврорального овала, характеризуется крайне неоднородной структурой даже на экваториальной стенке и связан с пиком T_p , а не T_e , как остальные провалы [10], поэтому этот провал относительно легко отделяется от остальных и здесь не рассматривается.

Зависимость вероятности наблюдения зимних дневных ионосферных провалов от долготы

Вариации вероятности наблюдения ионосферных провалов от долготы в зимних дневных условиях представлены на рис. 4 отдельно для северного (347 случаев) и южного (287 случаев) полушарий. Они подчиняются, в основном, закономерности, выявленной выше: дневной ГИП чаще всего наблюдается на долготах наиболее глубокой тени, т.е. на долготах вблизи $120-150^\circ$ в северном полушарии и $270-300^\circ$ в южном полушарии. Поскольку максимально глубокая тень достигается в южном полушарии, вероятность наблюдения дневного ГИП здесь достигает 70–80%. Отметим, что на рис. 4 представлен широкий интервал местного времени, для полуденных часов величина вероятности будет несколько ниже. Провал Малдрью чаще наблюдается на освещенных долготах – $\sim 300-330^\circ$ в северном и $\sim 120-150^\circ$ в южном полушариях, соответственно, причем в первом случае величина P достигает 70–75%. Нетрудно заметить, что характер долготных вариаций величины P меняется практически на противоположный со сменой полушария или типа провала. Поэтому суммарная вероятность наблюдения обоих провалов (без разделения на типы) менее сильно меняется с долготой, особенно в северном полушарии – рис. 4.

Итак, картина зимней дневной высокоширотной ионосферы оказалась довольно сложной. И хотя удалось выделить некоторые важные ее характеристики, существенные противоречия все еще остаются. Так, например, в работе [18] было проведено моделирование двух дневных провалов в сравнении с данными наземных станций. Исходные предпосылки в обоих случаях были одинаковы (предполагалось, что один провал выносится в дневные часы западным дрейфом, а другой создается в области полной тени), однако полученные в [18] результаты сильно отличаются от полученных выше как для освещенных долгот, где по данным [18] Солнце заполняет любой ионосферный провал, так и для неосвещенных долгот, где, как правило, фиксируются оба провала. Расхождения возникают, по-видимому, из-за различия в условиях проведения разных экспериментов и, в первую очередь, из-за разницы в уровне солнечной ионизации. В заключение отметим, что в положении провала также наблюдается долготный эффект, однако его анализ выходит за рамки данной работы и будет проведен в следующей.

Годовые вариации вероятности наблюдения ионосферного провала для околополуденных условий

Сезонные вариации вероятности наблюдения ионосферного провала для ночных условий исследовались статистическими методами по данным спутников "Ariel-3" [1] и "AE-C" [2]. Однако годовые вариации вероятности P в полном их объеме на рис. 5 представлены, по-видимому, впервые. Для этого было использовано 1294 случая для спокойных ($K_p = 1-3+$) околополуденных (20–04 LT) условий в обоих полушариях. Случаи хорошо выраженного ГИП представлены темной штриховкой, квазипровалы – светлой. Видно, что вероятность наблюдения ГИП зимой очень высокая и достигает 97% в декабре. Летом вероятность наблюдения провала не превышает 30% и падает до 20% в июле. Число квазипровалов возрастает при этом с 3–5 до 15–20%. Таким образом, наблюдается картина, аналогичная той, которая имела место на рис. 2: с ростом освещенности высокоширотной ионосферы провал заполняется солнечной ионизацией, становится менее глубоким и наблюдается реже. Однако в среднем вся кривая для P на рис. 5 сдвинута относительно максимумов солнцестояния примерно на $1/3-1/2$ месяца, так что вероятность наблюдения провала несколько ниже в сентябре по сравнению с мартом. Аналогичный сдвиг по фазе (примерно на $1/2-1$ месяца) имеют вариации фоновой концентрации, в чем можно убедиться, рассчитав концентрацию в области провала по модели IRI – рис. 5. Ясно, что чем меньше фоновая концентрация в области провала, тем легче образуется провал. Кроме того,

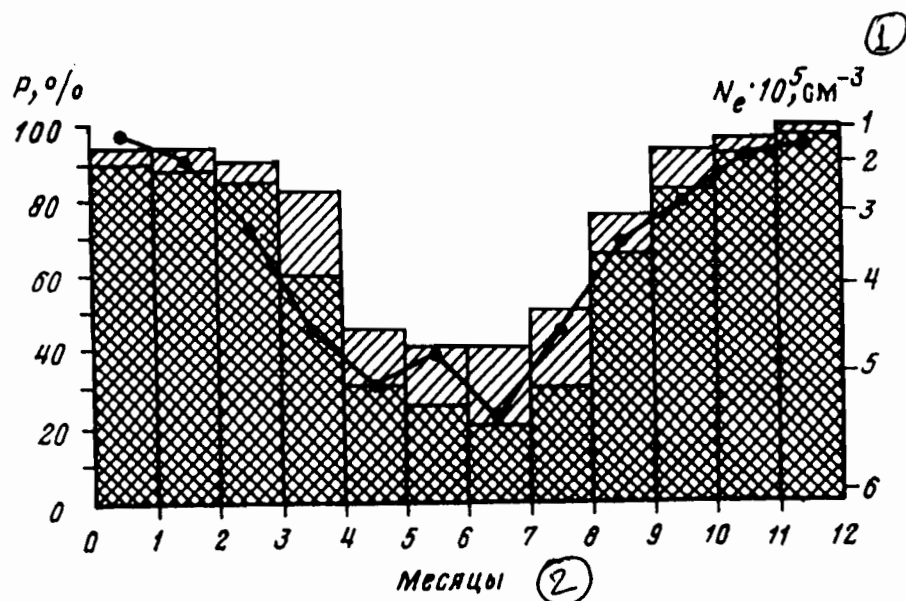


Рис. 5. Годовые вариации вероятности P наблюдения провала для околополуночных (20–04 MLT) спокойных ($K_p = 1-3+$) условий – темная штриховка и квазипровала – светлая. Кривой представлены изменения $N_m F_2$, рассчитанные по модели IRI для инвариантной широты 60° , 00 LT, $F_{10.7} = 200$

чем ниже фоновая концентрация, тем ниже проводимость высокоширотной ионосферы и тем больше электрическое поле магнитосферной конвекции, формирующее провал.

Зависимость вероятности наблюдения ночного летнего ионосферного провала от долготы

Поскольку условия образования провала зависят от условий освещенности высокоширотной ионосферы, которые летом ночью, так же как и зимой днем сильно меняются с долготой, вероятность наблюдения летнего провала также будет зависеть от долготы. На рис. 6 приведены вариации P с долготой для ночных (20–04 LT) летних условий около ($\pm 1,5$ мес) июньского солнцестояния в северном полушарии и декабрьского в южном полушарии. В северном полушарии использовано 258 случаев, в южном – 185. Провал, как и следовало ожидать, формируется в области тени и почти никогда не наблюдается на освещенных долготах, где относительно долго может существовать только в вырожденном виде, т.е. как квазипровал. Для сравнения на рис. 1е и рис. 1д приведены примеры хорошо развитого провала и квазипровала, соответственно.

Из сравнения рис. 4 и 6 видно, что максимумы и минимумы величины P для главного ионосферного провала меняются местами при смене полушария и сезона (времени дня). Это объясняется тем, что на высоких широтах зимой в полдень Солнце светит "прямо", а летом в полночь – с обратной стороны Земли, через полярную шапку. Соответствие, однако, является неполным, поскольку в зимних дневных условиях на удаленных от Солнца долготах все сутки имеет место "полярная ночь", а в летних ночных условиях даже на самых удаленных от Солнца долготах тень наблюдается всего несколько часов. Поэтому в среднем ГИП чаще образуется днем зимой ($P \sim 35\%$), чем ночью летом ($P \sim 25\%$). Тем не менее на долготах $60-90^\circ$ южного полушария летний провал в околополуночные часы образуется почти всегда, хотя далеко не столь хорошо выраженный, как зимой.

Выше было показано, что на формирование провала оказывают также влияние вариации фоновой концентрации. Это полностью относится и к рассматриваемым летним ночным условиям. При этом фоновые вариации электронной концентрации в

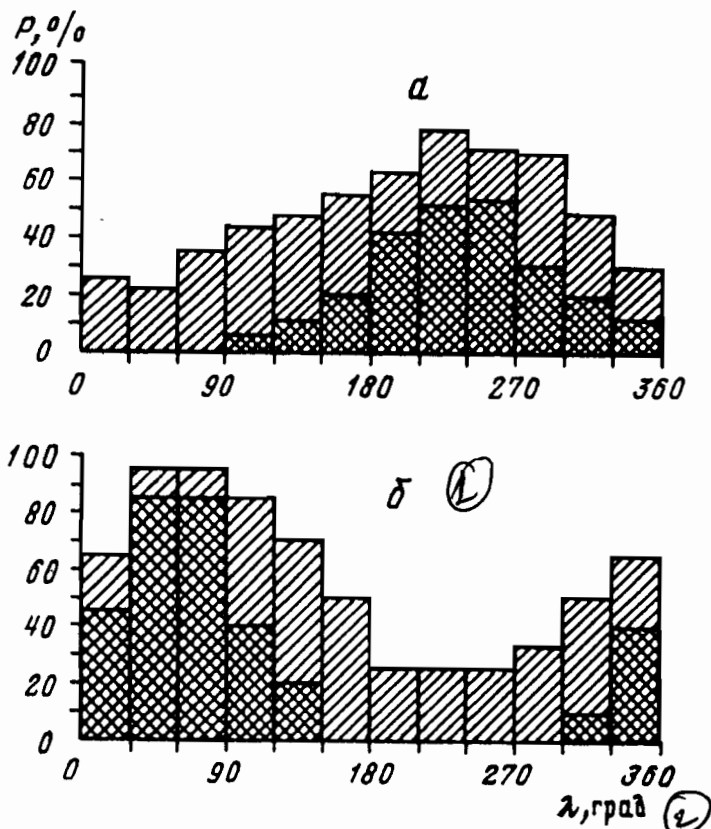


Рис. 6. Зависимость вероятности P наблюдения провала от долготы для летних ночных (20–04 MLT) спокойных ($K_p = 1-3+$) условий в северном (а) и южном (б) полушариях. Темная штриховка – провал, светлая – квазипровал

области провала определяются, в основном, действием солнечной ионизации и нейтрального ветра [20, 21]. Поскольку на долготах $30-90^\circ$ южного полушария наблюдается самая низкая фоновая концентрация, провал там появляется наиболее часто. Таким образом, провал как структура формируется под действием электрического поля магнитосферной конвекции, а вариации его характеристик с сезоном, местным временем и долготой определяются, главным образом, солнечной ионизацией и нейтральным ветром. Это относится к рассмотренным выше дневным зимним и ночным летним условиям.

Зависимость вероятности наблюдения ионосферных провалов от уровня магнитной активности

Зависимость вероятности P от уровня магнитной активности исследовалась как по отдельным бурям, так и статистически (см., например, [1, 6]). Результат этих исследований обычно выражается в очень общей форме: с ростом магнитной активности вероятность образования провала увеличивается. Рассмотрим, как эта закономерность выражается количественно для зимних дневных и летних ночных условий. Поскольку картина сильно зависит от условий освещенности, рассмотрим долготы с наиболее глубокой тенью и освещенные долготы по отдельности. На рис. 7а, б представлена зависимость величины P от K_p -индекса для летних ночных условий. Рассмотрено 120 случаев для неосвещенных долгот и 40 случаев для освещенных долгот обоих полушарий. Как видно из рис. 7а, в летних ночных условиях уже при $K_p \sim 5$, т.е. во время умеренной бури, на долготах наиболее полной тени провал наблюдается всегда. На освещенных Солнцем долготах (рис. 7б) хорошо выраженный

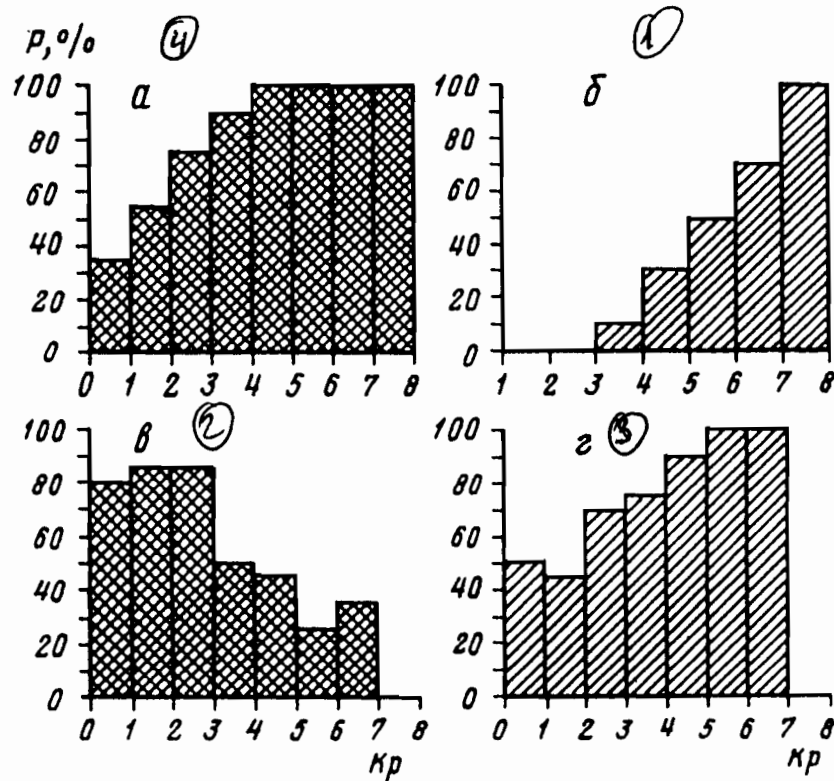


Рис. 7. Зависимость вероятности P наблюдения провала от K_p -индекса для освещенных долготных секторов северного и южного полушарий (светлая штриховка) и неосвещенных долготных секторов (темная штриховка) для летних ночных (а, б) и зимних дневных (в, г) условий

провал появляется только при $K_p > 3$ и наблюдается всегда только при очень сильном возмущении. Таким образом, во время сильной бури провал будет наблюдаться всегда даже в условиях местного лета. Заметим, однако, что в рассматриваемых условиях на спутнике "Космос-900" было отмечено всего несколько случаев очень сильных возмущений, поэтому точность определения величины P с ростом K_p уменьшается. Иная картина наблюдается в зимних дневных условиях, где в разных долготных секторах существуют, как правило, разные провалы. Поэтому на рис. 7в, г по отдельности представлены зависимости от K_p вероятности появления дневного ГИП в области наиболее полной тени и провала Малдрью на освещенных долготах обоих полушарий. Для этого рассмотрено 180 и 125 случаев соответственно в интервале 08–16 MLT. Очень сильные возмущения не попали в рассматриваемые долготные сектора, поэтому график ограничен величиной $K_p = 7$ и точность его на конце диапазона K_p небольшая. Кроме того, идентификация разных провалов в дневных условиях еще более затрудняется тем, что с ростом возмущенности вариации параметров ионосферы часто приобретают очень сложный характер. Поэтому даже для достаточно большого массива данных спутника "Космос-900" следует говорить только о тенденции в поведении дневных провалов. Тем не менее, она выделяется достаточно четко: вероятность наблюдения провала Малдрью растет с ростом K_p , а вероятность наблюдения дневного ГИП падает.

Разное поведение провала в разных условиях имеет простое объяснение. В летних ночных условиях с ростом K_p провал сдвигается в область все более глубокой тени, где увеличенное электрическое поле магнитосферной конвекции формирует все более глубокий провал. В зимних дневных условиях область тени по мере сдвига экваториальной границы авроральных диффузных высыпаний на более низкие широты уменьшается и дневной ГИП постепенно заполняется ионизацией. А вероятность

образования провала Малдрью, который, по-видимому, формируется электрическими полями и продольными токами с ростом их величины во время возмущения, растет. Таким образом, во время сильной бури в дневных зимних условиях будет наблюдаться, в основном, провал Малдрью.

Обсуждение результатов

И в ночных и в дневных условиях в ионосфере высоких широт могут с разной вероятностью наблюдаться три разных провала. Высокоширотный провал, как свидетельствуют данные спутника "OGO-6" [10], зимой существует внутри аврорального овала все сутки. КИП наблюдается на широтах остаточного кольцевого тока, в основном, в утренние часы на восстановительной фазе бури [7]. Но даже без учета КИП вероятность наблюдения ГИП в зимних ночных условиях очень высокая и достигает 97–98%. В дневных (зимних) условиях два провала (дневной ГИП и провал Малдрью) наблюдаются равновероятно, но, как правило, в разных долготных секторах. При этом, если провалы не разделять, то суммарная вероятность наблюдения обоих провалов в полдень достигает неожиданно высокой величины 70–80%. Если дневные провалы не разделять, то они в совокупности будут наблюдаться в очень широкой полосе широт (до 15° в утренние часы) даже при фиксированном значении K_p . И то и другое приводит к большим разногласиям между данными различных экспериментов. Вероятность P наблюдения провалов в зимних дневных и летних ночных условиях претерпевает сильные вариации в зависимости от трех факторов – уровня магнитной активности, условий освещенности и величины фоновой концентрации в области провала. Вариации фоновой концентрации, в свою очередь, определяются солнечной ионизацией, а также нейтральным ветром и составом термосферы. Все это приводит к суточным, сезонным и долготным вариациям величины P . Вероятность наблюдения ГИП определяется, в основном, конкуренцией магнитной активности и солнечной ионизации: с ростом возмущенности величина P растет, а с ростом освещенности – падает. В итоге в спокойных условиях летний ночной ГИП наблюдается только в тени и в минимуме фоновой концентрации, а во время сильной бури он появляется даже на освещенных долготах. Вероятность наблюдения зимнего дневного ГИП, наоборот, падает с ростом магнитной активности, поскольку он при этом сдвигается на более низкие широты, где освещенность резко увеличивается. Отметим, что при смене условий (летних ночных на зимние дневные) и полушария (северное на южное) освещенные и неосвещенные долготные сектора, практически, меняются местами. Кроме того, в зимних дневных условиях на освещенном Солнцем долготах появляется провал Малдрью. Таким образом, картина высокоширотной ионосферы резко меняется при смене полушария (при одном и том же наборе геофизических условий). Асимметрия полушарий проявляется, в частности, в разном характере вариаций положения, формы и вероятности наблюдения ионосферных провалов с долготой, местным временем и сезоном. Асимметрия полушарий, если речь идет о "мгновенных снимках" ионосферы, проявляется также в виде UT-контроля высокоширотной ионосферы. Асимметрия полушарий определяется разницей между географическим и геомагнитным полюсами, изменениями параметров магнитного поля (наклонения и склонения), а также сдвигом аврорального овала в ночной сектор относительно магнитного полюса.

Заключение

Детальный анализ большого массива однородных данных спутника "Космос-900" позволяет провести всестороннее исследование вероятности наблюдения разных ионосферных провалов для разных условий. Полученные выводы не только хорошо согласуются с результатами, полученными по другим наблюдениям, но и позволяют объяснить противоречия между ними. Главным итогом проведенного анализа

является достаточно целостная картина зависимости формирования ионосферных провалов от разных факторов. Ее отдельные аспекты следующие:

1. Провал является стабильной ($P \sim 90-95\%$) характеристикой ночной зимней субавроральной ионосферы. В зимних дневных и летних ночных условиях вероятность P снижается до $\sim 30\%$ и сильно зависит от условий освещенности. В летних дневных условиях хорошо выраженный провал практически не наблюдается.

2. В зимних дневных и летних ночных условиях степень освещенности высокоширотной ионосферы в геомагнитной системе координат и уровень фоновой ионизации зависят от долготы. Поэтому в летних ночных условиях провал наблюдается только в области тени и в минимуме фоновой ионизации, а в зимних дневных условиях в области тени наблюдается дневной ГИП, а на освещенных долготах – провал Малдрью. ГИП в полдень наблюдается наиболее редко, провал Малдрью – наиболее часто. Поскольку вероятности появления обоих провалов от местного времени и долготы находятся, практически, в противофазе, то суммарная вероятность слабо зависит от долготы и времени и достигает в северном полушарии $\sim 80\%$ в полдень. Все это определяет УТ-контроль высокоширотной ионосферы, с которым связана сильная асимметрия полушарий. УТ-контроль проявляется также в долготных вариациях положения минимума провала.

4. В ночных летних условиях вероятность наблюдения провала растет с ростом магнитной активности: в области тени провал существует всегда при $K_p \sim 5$, на освещенных долготах хорошо выраженный провал начинает появляться только при $K_p \sim 4$. В зимних дневных условиях вероятность появления ГИП (в области тени) падает с ростом активности, а вероятность наблюдения провала Малдрью (на освещенных долготах) растет.

5. Восход и заход Солнца четко делят зимний провал на ночной ($P \sim 95\%$) и дневной ($P \sim 30\%$). После захода солнца (в 17–19 LT) и в утренние часы (в 3–5 LT) имеют место пики вероятности P , которые связаны, очевидно, с несколькими причинами.

Работа выполнена при поддержке фонда РФФИ, грант N 97-05-64085.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tulunay Y., Sayers J.* Characteristics of the mid-latitude trough as determined by the electron density experiment on Ariel-III // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1971. V. 33. N 11. P. 1737.
2. *Spiro R.W.* A study of plasma flow in the mid-latitude ionization trough // *Doc. Phil. Thesis, Univ. of Texas at Dallas.* 1978. 120 P.
3. *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. N 2. P. 489.
4. *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.* 1983. V. 10. N 5. P. 405.
5. *Oksman J.* Apparent diurnal movements of the trough in total electron content (TEC) of the ionosphere // *Geophysica.* 1982. V. 19. N 1. P. 13.
6. *Бенькова Н.П., Зикрач Э.К.* Главный ионосферный провал по наземным наблюдениям в якутском регионе // *Физические процессы в области главного ионосферного провала.* Прага. 1983. С. 7.
7. *Демин М.Г., Карпачев А.Т., Афонин В.В. и др.* Динамика среднеширотного ионосферного провала в периоды бурь. 1. Качественная картина // *Геомагнетизм и аэрномия.* 1995. Т. 35. N 1. С. 73.
8. *Карпачев А.Т., Афонин В.В.* Два типа дневного зимнего провала, выделенные по данным ИСЗ "Космос-900" на высотах 350–550 км // *Геомагнетизм и аэрномия.* 1998. Т. 38. N 3. С. 68.
9. *Hardy D.A., Gussenhoven M.S., Holeman E.* A statistical model of auroral electron precipitation // *J. Geophys. Res.* 1985. V. 90. N 5. P. 4229.
10. *Grebowsky J.M., Taylor H.A., Lindsay J.M.* Location and source of ionospheric high latitude troughs // *Planet. Space Sci.* 1983. V. 31. N 1. P. 99.

11. Колесник А.Г., Голиков И.А. Эффект асимметрии плазмопаузы в локализации главного ионосферного провала // Геомагнетизм и аэрномия. 1985. Т. 25. N 2. С. 321.
12. Павлов А.В., Намгаладзе А.А. Колебательно возбужденный азот в верхней атмосфере // Геомагнетизм и аэрномия. 1988. Т. 28. N 5. С. 705.
13. Ляцкий В.Б., Мальцев Ю.П. О происхождении среднеширотного провала и полярной полости в распределении ионосферной концентрации // Геомагнетизм и аэрномия. 1981. Т. 21. N 1. С. 183.
14. Деминов М.Г., Ким В.П., Хегай В.В. Влияние продольных токов на структуру ионосферы // Геомагнетизм и аэрномия. 1979. Т. 19. N 4. С. 743.
15. Spiro R.F., Heelis R.A., Hanson W.B. Ion convection and the formation of the mid-latitude *F*-region ionization trough // J. Geophys. Res. 1978. V. 83. N 9. P. 4255.
16. Anderson P.C., Heelis R.A., Hanson W.B. The ionospheric signatures of rapid subauroral ion drifts // J. Geophys. Res. 1991. V. 96. N 4. P. 5785.
17. Collis P.N., Haggstrom I. Plasma convection and auroral precipitation processes associated with the main ionospheric trough at high latitudes // J. Atmos. Terr. Phys. 1988. V. 50. N 3/4. P. 389.
18. Sojka J.J., Schunk R.W., Whalen J.A. The longitude dependence of the dayside *F*-region trough: a detailed model-observation comparison // J. Geophys. Res. 1990. V. 95. N 9. P. 15275.
19. Muldrew D.B. *F* layer ionization troughs deduced from Alouette data // J. Geophys. Res. 1965. V. 70. N 11. P. 2635.
20. Карпачев А.Т. Распределение электронной концентрации во внешней ионосфере высоких широт южного полушария для ночных летних условий // Геомагнетизм и аэрномия. 1995. Т. 35. № 6. С. 82.
21. Карпачев А.Т. Распределение электронной концентрации вблизи максимума слоя F2 в северном полушарии для ночных летних условий // Геомагнетизм и аэрномия. 1996. Т. 36. N 4. С. 86.

Институт земного магнетизма,
ионосферы и распространения радиоволн РАН
Институт космических исследований РАН

Поступила в редакцию
04.03.97
После доработки
30.10.97