

## ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ЗИМНЕЙ УТРЕННЕЙ ИОНОСФЕРЫ ВЫСОКИХ И СРЕДНИХ ШИРОТ

© 2023 г. А. Т. Карпачев\*

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн  
им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Москва, Троицк, Россия*

\*e-mail: karp@izmiran.ru

Поступила в редакцию 23.03.2023 г.

После доработки 26.06.2023 г.

Принята к публикации 03.08.2023 г.

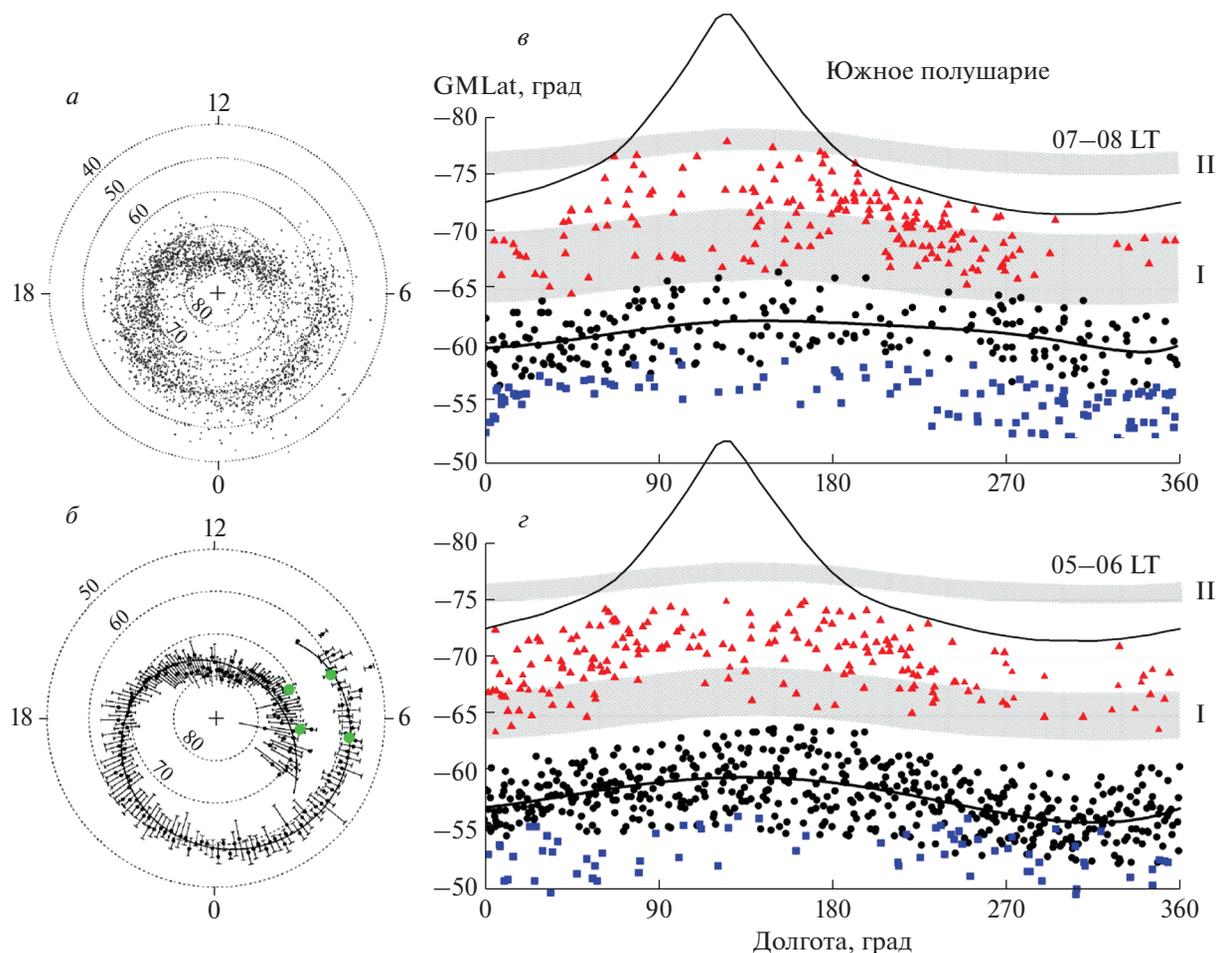
Проведено детальное исследование структуры утренней (05–09 LT) зимней ионосферы в Северном и Южном полушариях. Для этого использованы данные спутника CHAMP для спокойных условий в период высокой солнечной активности 2000–2002 гг. На основе тщательного анализа проведена идентификация провалов электронной концентрации: высокоширотного ионосферного провала, субаврорального, или главного, ионосферного провала и среднеширотного кольцевого ионосферного провала. Для идентификации и разделения высокоширотного и главного ионосферного провалов использована модель авроральных диффузных высыпаний Полярного геофизического института, которая описывает границы низкоширотной зоны I и высокоширотной зоны II авроральных диффузных высыпаний. Долготные вариации границ высыпаний были скорректированы по данным спутников DMSP. Проблема разделения провалов усложняется с течением местного времени, поскольку при этом главный ионосферный провал сильнее смещается к полюсу, чем авроральный овал, так что область его существования начинает накладываться на область существования высокоширотного провала. Для идентификации и разделения главного и кольцевого провалов были детально проанализированы все, даже слабые, геомагнитные возмущения за период наблюдений. Рассмотрена асимметрия Северного и Южного полушарий, выявлены подобные и различающиеся характеристики. Таким образом, получена более полная и точная картина структуры утренней ионосферы.

DOI: 10.31857/S0016794023600370, EDN: EGEUUT

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В пионерской работе [Muldrew, 1965] по данным спутника Alouette 1 было выделено два ионосферных провала. Один из них Muldrew определил как среднеширотный, или главный, ионосферный провал (ГИП), а второй как высокоширотный ионосферный провал (ВИП). Таким образом, на самом деле была поставлена проблема разделения провалов, поскольку Muldrew разделял их только по широте и рассматривал по отдельности. Более поздними исследованиями было установлено, что минимум ГИП наблюдается на  $2^{\circ}$ – $5^{\circ}$  экваториальнее границы авроральных диффузных высыпаний [Ahmed et al., 1979]. Следовательно ГИП является субавроральным провалом. И наоборот, ВИП наблюдается внутри аврорального овала [Grebowsky et al., 1983; Rodger et al., 1992]. Попытка разделить эти провалы на всем интервале местного времени была предпринята в работе [Werner and Pröls, 1997] по данным спутника DE-2. Авторы этой работы создали модель положения провала в виде спирали Архимеда с двумя ветвями в

утреннем секторе, низкоширотной и высокоширотной (рис. 1). Разделение было проведено чисто механически: провалы на широтах ниже  $65^{\circ}$  были отнесены к низкоширотной ветви, т.е. к ГИП, а выше  $65^{\circ}$  – к высокоширотной ветви, т.е. к ВИП. Попытка разделить провалы по физическим принципам была предпринята в работе [Karpachev, 2019] на основе большого массива данных спутника CHAMP. Разделение ГИП и ВИП проводилось только по одному критерию – по положению относительно экваториальной границы авроральных диффузных высыпаний. Однако эта граница была получена усреднением данных нескольких экспериментов, а положение провала по данным спутника CHAMP определяется для данных конкретных условий и характеризуется большим разбросом. В результате идентификация провалов, расположенных с обеих сторон близко к экваториальной границе аврорального овала высыпаний, оказалась неопределенной. Поэтому были предприняты следующие попытки разделения провалов в околополуденной (23–01 LT) [Karpachev, 2022a], а также утрен-



**Рис. 1.** Слева: исходные данные спутника DE-2 (вверху) и модель провала (внизу), построенная по ним [Werner and Pröls, 1997]. Справа: распределение провалов с долготой по данным CHAMP в Южном полушарии для 05–06 LT (внизу) и 07–08 LT (вверху). ВИП обозначен треугольником, ГИП – черным кругом, КИП – квадратом. Заштрихованные области – зоны I и II диффузных авроральных высыпаний согласно модели [Vorobjev et al., 2013].

ней (05–06 LT) и вечерней (17–19 LT) ионосфере [Karpachev, 2022b]. В этих работах применялась более совершенная методика, в которой использовалась модель авроральных высыпаний, полученная по данным спутников DMSP в ПГИ и установленная на сайте (<http://apm.pgia.ru>) [Vorobjev et al., 2013]. Эта модель описывает положение зоны I диффузных высыпаний на экваториальном крае аврорального овала и зоны II на его полярном крае. Как известно, высыпания зоны I формируют полярную стенку ГИП, эффекты же зоны II никогда не учитывались. Между тем оказалось, что высыпания зоны II, как правило, формируют полярную стенку ВИП [Karpachev, 2022a]. Разделение провалов проводилось по соответствию полярной стенки ГИП положению зоны I, а полярной стенки ВИП – положению зоны II высыпаний. Это является ключевым моментом при разделении ГИП и ВИП. Кроме того, поскольку границы обеих зон изменяются с долготой на  $\sim 2.5^\circ$  [Vorobjev и Ягодкина, 2010; Luan

et al., 2011] подобно вариациям положения ГИП, анализ наиболее эффективно проводить в рамках долготного эффекта. Наличие этого эффекта приводит к тому, что проблема разделения ГИП и ВИП сильно различается на разных долготах.

Среднеширотные провалы, расположенные экваториальнее ГИП, также впервые были четко отделены от ГИП. Главным среди них является КИП. Он образуется даже после слабого усиления геомагнитной активности и может долго (иногда двое суток) наблюдаться на широтах около  $L \sim 3$  ( $54^\circ\text{--}56^\circ$  GMLat) [Karpachev, 2020]. Отделить ГИП от КИП не менее сложно, чем ГИП от ВИП, но методика такого разделения была тщательно разработана ранее [Karpachev, 2020]. Она основана, главным образом, на учете предистории развития возмущения. Поэтому все, даже слабые, геомагнитные возмущения за рассматриваемый период были тщательно проанализированы.

Опыт, накопленный ранее, используется в настоящей статье для разделения провалов в позднем утреннем секторе (07–09 LT). В этом секторе наблюдался самый большой разброс в положении провалов (52°–77°) [Karachev, 2019], что несомненно указывает на существование по крайней мере двух разных провалов, как это и отражает спираль Архимеда в модели [Werner and Pröls, 1997]. Таким образом, целью работы является как можно более точное разделение провалов (ВИП, ГИП и КИП) в наиболее проблемных условиях согласно физическим критериям на основе разработанной в предыдущих работах методике.

## 2. ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ

Анализ проводился по данным спутника CHAMP для высокой солнечной активности ( $F10.7 \geq 150$ ) в период 2000–2002 гг. для условий местной зимы. Спутник обращался практически на полярной орбите с наклоном 87°. CHAMP проводил прямые измерения электронной концентрации  $N_e$  на высоте, которая за время наблюдений снизилась с 470 до 390 км. Вариации  $N_e$  ниже представлены в терминах плазменной частоты  $f_p$ . Измерения проводились через  $\sim 1^\circ$  по широте, что позволяет достаточно точно определять положение минимума провала. Данные отбирались за относительно спокойные периоды времени с  $Kp = 0-4$ , где  $Kp$  – текущий 3-часовой индекс магнитной активности. Данные спутника CHAMP находятся в свободном доступе на сайте (<http://op.gfz-potsdam.de/champ>).

## 3. ЛОКАЛИЗАЦИЯ ИОНОСФЕРНЫХ ПРОВАЛОВ В УТРЕННЕМ СЕКТОРЕ ЮЖНОГО ПОЛУШАРИЯ

На рис. 1<sub>г</sub> приведены вариации положения ВИП, ГИП и КИП с долготой для 05–06 LT. Данные CHAMP были получены для высокой солнечной активности за период 1–20 июля 2001 г. и 6–25 августа 2002 г. Всего было зарегистрировано 538 случаев ГИП, так что этот провал наблюдался с вероятностью  $\sim 90\%$ . Данные для 05–06 LT рассматривались ранее [Karachev, 2022b], но на рис. 1<sub>г</sub> они приведены в уточненном виде. Для этого положение каждого провала было приведено к  $Kp = 2$  согласно стандартной зависимости от  $Kp$ -индекса  $\Lambda_T = \Lambda + aKp$  [Moffett and Quegan, 1983], где  $\Lambda$  текущее положение провала, а коэффициент  $a$  был определен как  $0.7^\circ$  для ВИП,  $1.7^\circ$  для ГИП и  $1.1^\circ$  для КИП. Во всех случаях положение провалов представлено в геомагнитной широте, поэтому термин GMlat ниже опускается. Долготные вариации положения зон высыпаний для утренних часов ранее приводились в том виде, как они были выделены в работе [Luan et al., 2011] для околополуночных часов. Они также подверглись уточ-

нению. Для этого были использованы данные спутника DMSP-F12, отобранные для четырех дней в июне 2000 г. при  $Kp \sim 2$ . Спутник длительный период находился в Южном полушарии в секторе 5.5–6.5 LT. Долготные вариации положения экваториальной границы авроральных высыпаний низкоэнергичных частиц ( $< 1$  КэВ), выделенные по данным DMSP-F12 для 5.5–6.5 LT, несколько отличаются от вариаций экваториальной границы аврорального овала, выделенных в работе [Luan et al., 2011] для дополуночных часов местного времени. Однако они практически совпадают с вариациями угла наклона земного диполя, как и предполагалось в работе [Воробьев и Ягодкина, 2010]. Поэтому на рис. 1 долготные вариации границ зоны I и зоны II для всех часов местного времени фактически описываются вариациями угла наклона диполя. Их амплитуда составляет  $2.5^\circ$ , а среднее положение соответствует рассматриваемому местному времени и  $Kp = 2$  согласно модели аврорального овала высыпаний [Vogobjev et al., 2013]. Графическое отображение этой модели для  $Kp \sim 2$ , а также долготные вариации аврорального овала представлены в работах [Karachev, 2022a, b].

Разделение провалов для 05–06 LT детально обсуждалось ранее [Karachev, 2022b], поэтому оно в уточненном виде приведено на рис. 1<sub>г</sub> в основном для сравнения с аналогичной картиной ионосферы для 07–08 LT. Из рис. 1<sub>г</sub> видно, что в интервале местного времени 05–06 LT наблюдается довольно большой зазор между множеством ГИП и ВИП. Проблема их разделения возникает только на долготах  $150^\circ-180^\circ$  E, где ГИП в Южном полушарии расположен наиболее высоко по широте вследствие долготного эффекта [Karachev et al., 2019].

Тонкой кривой на рис. 1<sub>в</sub>, 1<sub>г</sub> показано наклонение спутника в рамках геомагнитной широты. Видно, что наблюдение ВИП на большинстве долгот сильно ограничено со стороны высоких геомагнитных широт. Поэтому долготные вариации среднего положения этого провала не представлены на рис. 1, хотя они, скорее всего, подобны вариациям положения аврорального овала. Однако указанное ограничение никак не сказывается на решении поставленной задачи, поскольку нас интересует ситуация только на экваториальной границе аврорального овала.

Картина провалов для 06–07 LT подобна картине для 05–06 LT, поэтому она не приводится и не обсуждается. Качественные изменения накапливаются только к 07–08 LT, как видно на рис. 1<sub>в</sub>. Данные CHAMP на верхнем графике относятся к периоду 3–24 июня 2001 г. и 21–31 июля 2002 г. ГИП в этот период регистрировался 232 раза, что составляет  $\sim 65\%$  от всего количества случаев, и что гораздо меньше, чем в период 05–06 LT. Про-

валы были отобраны для  $Kp = 0-4$  и также приведены к  $Kp = 2$ . Коэффициент  $a$  в этом случае оказался равным  $0.7^\circ$  для ВИП,  $1.5^\circ$  для ГИП и  $1.3^\circ$  для КИП. Все провалы к 07–08 LT сместились к полюсу, сильнее всего ГИП. В результате ГИП в среднем оказался дальше от КИП и ближе к ВИП. Поэтому разделение ГИП и КИП стало несколько проще, а ГИП и ВИП наоборот, намного сложнее. Зазор между ними практически исчез, область существования ГИП теперь накладывается на область существования ВИП и соответственно проблема разделения провалов усугубляется, что и обсуждается ниже.

На рис. 1 слева для сравнения приведены данные спутника DE-2, представленные в работе [Werner and Prölss, 1997]. Данные спутника покрывали период с августа 1981 г. по февраль 1983 г., который также относится к высокой солнечной активности ( $F10.7 \sim 180$ ). Верхний полярный график (рис. 1а) представляет исходные данные DE-2. Авторы процитированной работы не учитывали зависимость от  $Kp$ -индекса, поэтому провалы разбросаны по широте так сильно, что в 05–06 LT нет зазора между низкоширотными и высокоширотными провалами, как на рисунке справа. Именно поэтому авторам пришлось разделять провалы чисто механически, на широте  $65^\circ$ . В интервале 07–08 LT на верхнем полярном графике наоборот, ветви провала довольно четко разделяются. Однако как раз в это время низкоширотная ветвь провала практически исчезает. На рис. 1в случаев ГИП в 07–08 LT действительно гораздо меньше, чем ранним утром, но еще достаточно много, чтобы низкоширотная ветвь провала четко проявлялась на всех долготах. Напомним, что вероятность наблюдения ГИП рано утром составляет почти 90%, а к 07–08 LT уменьшается до 65%. В интервале 08–09 LT вероятность наблюдения ГИП составляет менее 50%, но этого количества тоже еще достаточно для формирования низкоширотной ветви. Далее анализ не проводился, поскольку после 09 LT начинает сказываться крайне специфическая динамика дневного каспа, которая требует особого рассмотрения. Среднее для всех долгот положение ГИП для 05–06 LT равно  $-58^\circ$ , а для 07–08 LT составляет  $-61^\circ$ . Эти значения на модели DE-2 (рис. 1б) отмечены зелеными кружками, видно, что они точно ложатся на низкочастотную ветвь спирали Архимеда, хотя она была получена по данным в Северном полушарии. Среднее положение ВИП также отмечено на модели DE-2 зелеными кружками. Данные DE-2 и CHAMP довольно сильно расходятся: в интервале 05–06 LT как  $70^\circ$  и  $72^\circ$ , а в интервале 07–08 LT как  $71^\circ$  и  $76^\circ$  соответственно. Значение  $76^\circ$  для среднего положения ВИП явно завышено. Таким образом, по данным CHAMP получена гораздо более адекватная картина провалов в утреннем секторе, чем по данным DE-2 в

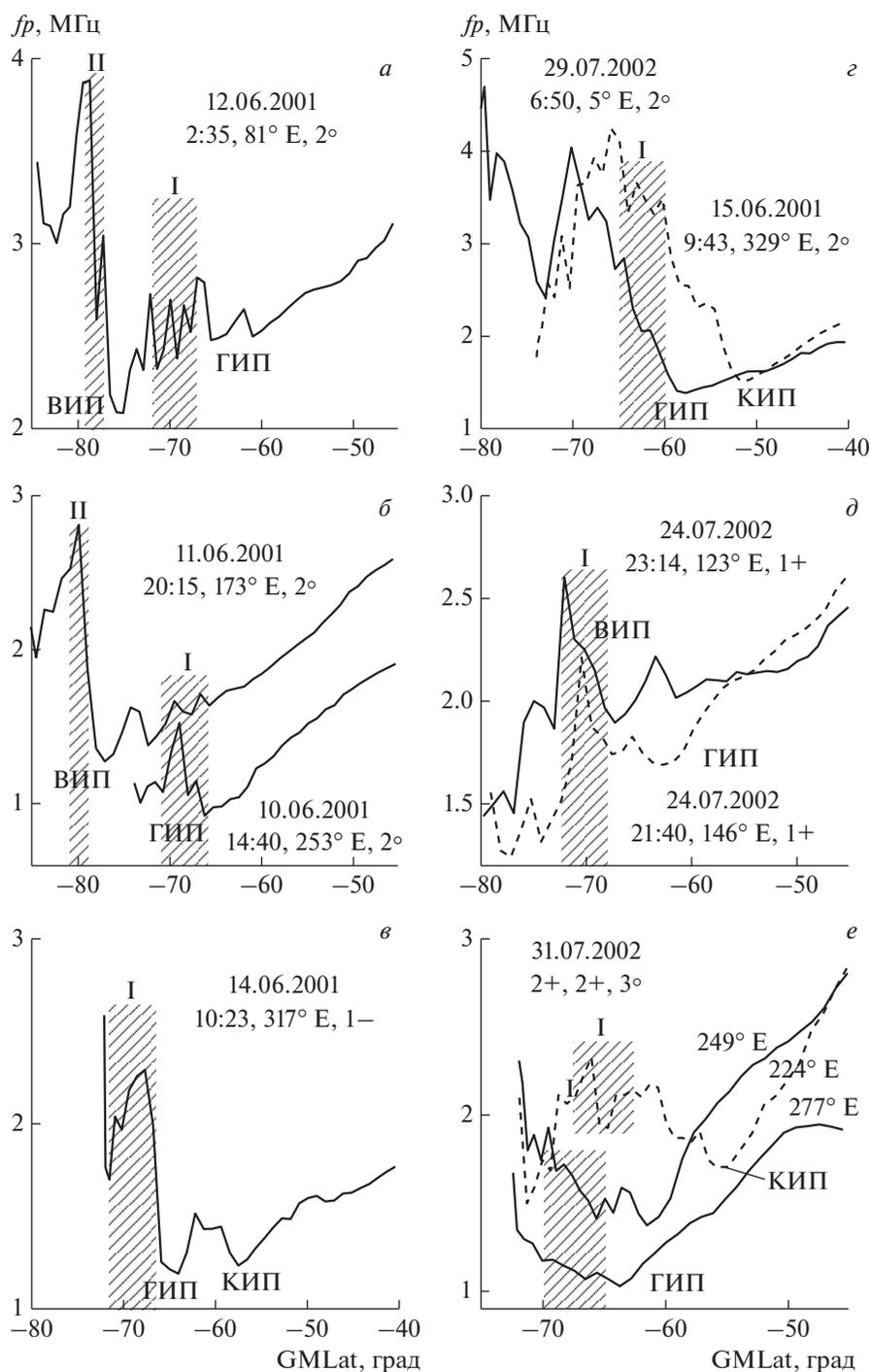
работе [Werner and Prölss, 1997]. Проанализируем ее более детально.

На рис. 2 приведено несколько специфических примеров структуры высокоширотной ионосферы в интервале 07–08 LT. Широтный профиль  $f_p$  на рис. 2а был получен 12 июня 2001 г. в долготном секторе  $81^\circ$  E. На нем можно наблюдать два провала, ВИП и ГИП. ГИП имеет сложную структуру с двумя минимумами на широтах  $60^\circ-65^\circ$ . Его невысокая и неоднородная полярная стенка формируется высыпаниями зоны I, которая отмечена штриховкой. Полярная стенка высокоширотного провала соответственно формируется высыпаниями зоны II.

ГИП и ВИП могут наблюдаться и по отдельности – рис. 2б. На рис. 2б наоборот, ВИП в долготном секторе  $173^\circ$  E имеет сложную структуру с двумя минимумами. На широтах зоны I высыпаний наблюдаются небольшие неоднородности электронной концентрации, но в данном случае, ни полярная стенка ГИП, ни его минимум не образуются. Т.е. уверенно определяется только ВИП. ГИП на рис. 2б был зарегистрирован 10 июня 2002 г. на долготе  $253^\circ$  E. Зона I высыпаний для этой долготы расположена на  $\sim 1^\circ$  экваториальнее, чем на долготе  $173^\circ$  E, но это не принципиально; ясно, что эти высыпания сформировали полярную стенку провала, т.е. это ГИП. Отметим, что его минимум находится на предельной для ГИП широте  $-66^\circ$ .

На рис. 2в также четко регистрируются два провала. Но в данном случае это ГИП и КИП. КИП образовался после слабого всплеска геомагнитной активности с  $Kp = 2+$ , и, как обычно расположен экваториальнее ГИП, далеко от аврального овала.

ГИП и КИП также могут наблюдаться по отдельности – рис. 2г. ГИП наблюдался на широте  $58^\circ$ , это средняя широта для долготы  $5^\circ$  E и  $Kp = 2$  (рис. 1в). КИП сформировался 15 июня 2001 г. также после небольшого усиления геомагнитной активности с  $Kp = 3$ . Оба примера КИП на рис. 2 относятся к долготам Америки. Это не случайно, поскольку именно на долготах Америки КИП наблюдается наиболее часто, как показывает рис. 1. На долготах Америки магнитное поле слабое, высыпания частиц в ионосферу из магнитосферного кольцевого тока сильные и провал образуется чаще, чем на других долготах. Поэтому иногда КИП появляется только тогда, когда спутник достиг долгот Америки, хотя всплеск магнитосферной активности наблюдался по времени на предыдущих витках. Отметим, насколько схожи широтные профили электронной концентрации в обоих случаях. Это означает, что ГИП и КИП нельзя различить по форме, а только по динамике их развития с течением времени.



**Рис. 2.** Примеры наиболее характерных структур ионосферы в интервале 07–09 LT. Заштрихованы зоны I и II высыпаний. Для каждого случая указаны дата, мировое время, долгота и  $Kp$ -индекс. Детальное описание см. в тексте.

На рис. 2д приведено два широтных профиля  $f_p$ , зарегистрированных 24 июля 2002 г. на соседних витках. Оба они получены для  $Kp = 1+$  на близких долготах, поэтому положение зоны I высыпаний для них примерно одно и то же. Профиль  $f_p$  в долготном секторе  $146^\circ$  E интерпретируется просто – глубокий минимум на широте

$-62.8^\circ$  относится к ГИП, полярная стенка которого сформирована высыпаниями зоны I. Профиль в долготном секторе  $123^\circ$  E интерпретируется с большим трудом. Слабо выраженный, тем не менее четко определяемый минимум электронной концентрации находится на широте  $-61.5^\circ$ , а более глубокий минимум на широте  $-67.5^\circ$ . Мож-

но предположить, что первый минимум соответствует ГИП, а второй – ВИП, тем более, что он находится на слишком большой широте для ГИП. Однако полярная стенка этого провала явно сформирована высыпаниями зоны I. Таким образом, скорее всего, мы имеем дело с неоднородной структурой электронной концентрации в днище ГИП. Поэтому оба минимума были определены как ГИП на рис. 1*в*.

Интересная динамика провалов наблюдалась 31 июля 2002 г. – рис. 2*е*. На первом витке, в долготном секторе 277° E регистрировался провал с минимумом на обычной для ГИП при  $Kp = 2+$  широте  $-63.8^\circ$ . На третьем витке после небольшого усиления магнитосферной активности до  $Kp = 3$  зона I высыпаний сдвинулась к экватору и образовался КИП на широте  $-55.8^\circ$ , т.е. гораздо экваториальнее аврорального овала. ГИП на этом витке выделить трудно. Еще труднее интерпретировать широтный профиль  $f_p$  на втором, промежуточном витке. Вероятнее всего, это некоторая совместная структура ГИП и КИП. Но поскольку ее минимум находится на широтах ГИП, он и представлен на рис. 1*в* как ГИП.

Рассмотренные примеры показывают, что правильная интерпретация сложных случаев возможна только при тщательном анализе провалов в динамике во времени. Продемонстрируем этот принцип еще раз на следующем примере. На рис. 3 приведены несколько витков ШАМР для 26 июля 2002 г., записанные в интервале от 4:36 UT до 14:00 UT.  $Kp$ -индекс в этот период изменялся слабо, от 3– до 2, поэтому зона I высыпаний для всех витков примерно одна и та же, что в данном случае не принципиально. Первый виток был записан в долготном секторе 41° E спустя несколько часов после возмущения с  $Kp = 4-$ . Провал с минимумом  $-58.6^\circ$  при  $Kp = 3-$  соответствует ГИП с полярной стенкой, сформированной высыпаниями зоны I. На следующем витке образовался КИП, который в долготном секторе 333° E при  $Kp = 3-$  ярко проявился на своей типичной широте  $-54.9^\circ$ . Можно также выделить слабый признак ГИП на широте  $\sim 57^\circ$ . На следующем витке в долготном секторе 310° E ярко проявились оба провала, что делает проблему их разделения простой. То же самое относится к следующему витку, хотя провалы не так ярко выражены. На последнем витке КИП практически не фиксируется и наблюдается один, четко выраженный ГИП с полярной стенкой на широтах зоны I высыпаний.

#### 4. ЛОКАЛИЗАЦИЯ ИОНОСФЕРНЫХ ПРОВАЛОВ В УТРЕННЕМ СЕКТОРЕ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ

Таким образом, данные ШАМР позволяют существенно уточнить в утреннем секторе картину провалов, полученную в работе [Werner and

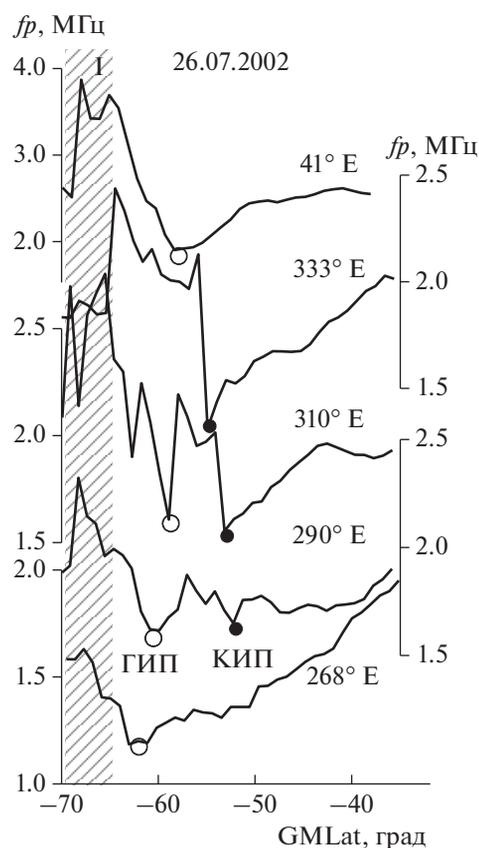


Рис. 3. Динамика ГИП и КИП на нескольких последовательных витках ШАМР 26 июля 2002 г. Минимум ГИП отмечен пустым кружком, минимум КИП – заполненным. Заштрихована зона I авроральных диффузных высыпаний.

Prölss, 1997]. Однако в этой работе были использованы данные DE-2 только в Северном полушарии, возможно они дают картину, отличную от полученной в Южном полушарии. Чтобы проверить это, было получено аналогичное распределение провалов для 07–08 LT в Северном полушарии – рис. 4.

Данные ШАМР в Северном полушарии для высокой солнечной активности для относительно спокойных условий  $Kp \leq 4$  были отобраны в интервалах 28–29 января и 6–15 февраля 2001 г., а также 28–30 ноября и 1–12 декабря 2002 г. Всего было зарегистрировано 244 случая ГИП, вероятность наблюдения составляет  $\sim 75\%$ , что несколько больше, чем в Южном полушарии.

Долготные вариации положения зон высыпаний в Северном полушарии были выделены в работах [Воробьев и Ягодкина, 2010; Luan et al., 2011] также только для околополуденных часов. И они так же, как и в Южном полушарии были скорректированы. Для этого были использованы данные спутника DMSP-F13, отобранные для четырех дней в декабре 2000 г. при  $Kp \sim 2$ . В Север-

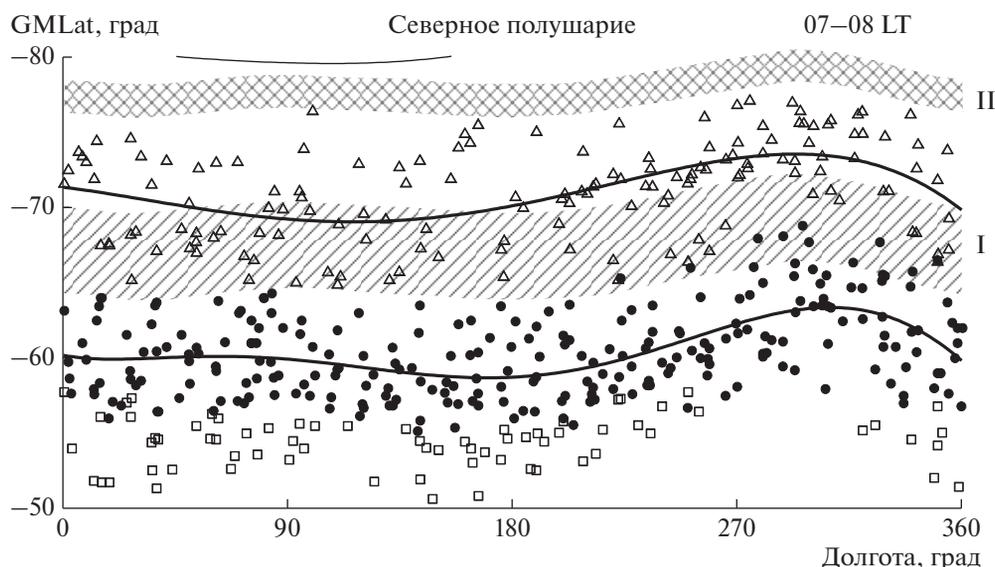


Рис. 4. Распределение провалов с долготой по данным СНАМР для 07–08 LT в Северном полушарии. ВИП обозначен треугольником, ГИП – черным кругом, КИП – квадратом. Заштрихованные области – зоны I и II авроральных диффузных высыпаний согласно модели [Vorobjev et al., 2013].

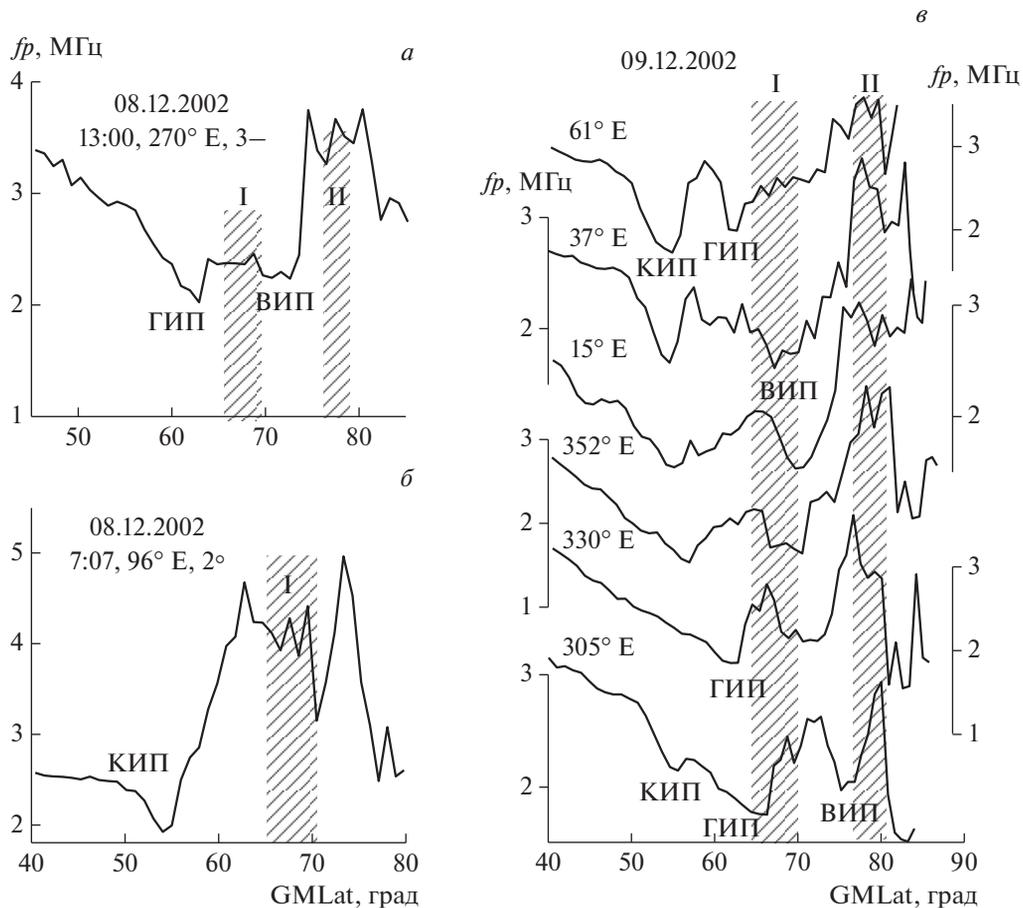
ном полушарии спутник в этот период находился в секторе 6.7–8.3 LT. Долготные вариации положения экваториальной границы авроральных высыпаний мягких частиц, выделенные по данным F13 несколько отличаются от вариаций экваториальной границы аврорального овала, выделенных в указанных выше работах. Но поскольку первые довольно точно привязаны по местному времени к данным СНАМР, то они и приведены на рис. 4. И точно так же, как и в Южном полушарии, их амплитуда составляет  $\sim 2.5^\circ$ , а среднее положение соответствует рассматриваемому местному времени (7.5 LT) и  $Kp = 2$  согласно модели аврорального овала высыпаний [Vorobjev et al., 2013].

Картина провалов в Северном полушарии принципиально не отличается от картины в Южном полушарии. Как и в Южном полушарии положение каждого провала было приведено к  $Kp = 2$ , при этом коэффициент  $a$  был определен как  $0.6^\circ$  для ВИП,  $1.5^\circ$  для ГИП и  $1.1^\circ$  для КИП. В Северном полушарии в интервале 07–08 LT, так же как и в Южном, нет большого зазора по широте между массивами данных ВИП и ГИП. Следовательно, снова приходится тщательно разделять случаи расположенных наиболее высоко по широте ГИП и расположенных наиболее низко по широте ВИП. Ниже приведен пример такого анализа, но сначала выделим различия между Северным и Южным полушариями. Сильнее всего асимметрия полушарий сказывается в разном характере долготных вариаций положения разных структур. В Южном полушарии ГИП максимально удален к полюсу на долготах  $120^\circ$ – $150^\circ$  E восточного полушария, а в Северном полушарии на долготах Америки

$270^\circ$ – $300^\circ$  E в Западном полушарии, как отмечалось ранее [Karpachev et al., 2019]. Это связано, в первую очередь, с изменениями характера вариаций геомагнитного поля при переходе из Северного полушария в Южное. Отрезок кривой на рис. 4 около  $80^\circ$  отображает наклонение спутника на долготах  $45^\circ$ – $155^\circ$  E, остальная кривая лежит за пределами графика. Таким образом, в Северном полушарии наклонение орбиты не ограничивает возможность наблюдения высокоширотных провалов. Поэтому на рис. 4 приведено среднее положение ВИП. Как показывает сравнение, долготные вариации ВИП и ГИП подобны. Это скорее всего справедливо и для Южного полушария, где наклонение спутника сильно ограничивает наблюдение высокоширотной структуры ионосферы на большинстве долгот.

КИП в Северном полушарии наиболее редко наблюдается на долготах Америки. Это связано с тем, что на этих долготах все частицы во время колебаний вдоль геомагнитной линии высыпаются в Южном полушарии, где геомагнитное поле наиболее слабое. На остальных долготах Северного полушария сильной изменчивости интенсивности высыпаний горячих частиц (протонов) не наблюдается, что отмечалось еще в работе [Berg, 1972]. Эти закономерности в высыпаниях соответственно проявляются и в формировании КИП.

На рис. 5a приведен довольно характерный широтный профиль  $f_p$  для рассматриваемых условий. На нем отражены классические провалы ГИП и ВИП, полярные стенки которых сформированы соответствующими высыпаниями. Спе-



**Рис. 5.** Типичный широтный профиль  $f_p$  в Северном полушарии (а). КИП, наблюдавшийся отдельно (б). Динамика ВИП, ГИП и КИП на нескольких последовательных витках СНАМР 9 декабря 2002 г. (в). Заштрихованы зоны I и II авроральных диффузных высыпаний.

цифкой этого профиля является невысокая полярная стенка ГИП. Иногда она была настолько слабо выражена, что оба провала сливались в одну, плоскую структуру. Почему-то такая структура оказалась присущей именно Северному полушарию. Можно сделать вывод, что высыпания зоны I в Северном полушарии утром часто были очень слабые.

На рис. 5б приведен очень четко выраженный пример КИП, который сформировался после возмущения с  $Kp = 4-$ , которое имело место 7 декабря 2002 г. Минимум КИП расположен на классической для него широте  $54^\circ$ , далеко от аврорального овала и наблюдается один, без каких либо признаков ГИП.

Сложный пример наблюдений в Северном полушарии на долготах  $61^\circ-305^\circ$  E приведен на рис. 5в. Он потребовал тщательного анализа провалов в динамике. Наблюдения относятся к 9 декабря 2002 г. В этот день  $Kp$  изменялся от 3 до 1-, поэтому все провалы приведены к  $Kp = 2$ , чтобы положение обеих полос высыпаний на рис. 5в бы-

ли одинаковыми для всех витков. На первом витке в долготном секторе  $61^\circ$  E наблюдается ГИП экваториальнее аврорального овала, и ярко выраженный, глубокий КИП, который образовался на этом витке после возмущения с  $Kp = 3$ . На своих обычных широтах  $54^\circ-56^\circ$  КИП существует еще на трех витках, хотя уже на втором витке геомагнитная активность резко упала до  $Kp = 1-$ . На третьем витке также наблюдаются два провала, но теперь это КИП и четко выраженный ВИП. Минимум более высокоширотного провала на втором витке находится в некотором промежуточном состоянии, поскольку он расположен внутри высыпаний зоны I. Однако его полярная стенка однозначно связана с высыпаниями зоны II, т.е. это ВИП. Таким образом, на витках 1-3 ГИП плавно трансформировался в ВИП, что можно отследить только при внимательном анализе динамики провалов. Точно так же КИП плавно трансформировался в ГИП при переходе из долготного сектора  $352^\circ$  E в долготный сектор  $330^\circ$  E. На последнем витке в долготном секторе  $305^\circ$  E наблюдается след от КИП на широте  $55^\circ$  и ГИП с

минимумом уже в полосе высыпаний. На самом деле полоса высыпаний на долготе  $305^\circ$  E согласно рис. 1 расположена немного полярнее, но это не принципиально, на рис. 1 несколько провалов на долготах Америки расположены еще глубже в полосе высыпаний. И все они относятся к ГИП, как показал анализ их динамики.

Приведенные примеры еще раз показывают, что однозначно разделить и классифицировать провалы ионизации можно только при тщательном анализе их динамики со временем.

## 5. ВЫВОДЫ

Задача разделения провалов действительно более сложная в позднем утреннем секторе, чем в раннем. Причина проста: в 05–06 LT ГИП далеко отстоит от аврорального овала, так что между ГИП и ВИП существует довольно большой зазор по широте. С течением времени ГИП вследствие высокоширотной конвекции плазмы сильнее смещается к полюсу, чем авроральный овал, поэтому к 07–08 LT область существования ГИП накладывается на область существования ВИП. В результате самые высокоширотные случаи ГИП легко спутать с самыми низкоширотными случаями ВИП, поскольку по форме они не различаются.

Несмотря на все сложности, эту проблему удалось достаточно успешно решить. Для разделения ВИП и ГИП использовалась модель авроральных диффузных высыпаний, которая описывает зону I на экваториальной границе аврорального овала и зону II на его полярной границе [Vorobjev et al., 2013]. Анализ проводился с учетом динамики провалов с течением времени. При этом отслеживалось соответствие положения полярной стенки ГИП высыпаниям зоны I, а полярной стенки ВИП – высыпаниям зоны II. А поскольку оказалось, что положения всех структур высокоширотной ионосферы подвержены вариациям с долготой, то и анализ более эффективно проводить в рамках долготного эффекта. При этом долготные вариации экваториальной границы авроральных высыпаний были выделены по данным спутника DMSP-F12 в Южном полушарии и F13 – в Северном. По форме эти вариации совпадают с вариациями угла наклона земного диполя. Отметим, что долготные вариации положения зон высыпаний, выделенные ранее в работах [Воробьев и Ягодкина, 2010; Luan et al., 2011] для околополночных условий немного отличаются от вариаций, выделенных по данным DMSP и от вариаций угла наклона диполя. Однако этот вопрос требует более глубокого рассмотрения на большом массиве данных по высыпаниям, полученных для всех часов местного времени.

Асимметрия полушарий проявляется ярче всего в кардинально разном характере долготных

вариаций положения всех структур ионосферы. В Северном полушарии ГИП и авроральный овал наиболее удалены к полюсу на долготах Америки, а в южном на долготах Азии. На этих долготах проблема разделения провалов усложняется. Что касается среднего положения ГИП, то оно также немного различается: ГИП при  $Kp = 2$  находится на широте  $60.3^\circ$  в Северном полушарии и  $60.8^\circ$  в Южном. На рис. 4a приведен довольно характерный для Северного полушария широтный профиль  $f_p$  с двумя провалами, ГИП и ВИП. Спецификой этого профиля является невысокая полярная стенка ГИП и хорошо выраженная полярная стенка ВИП. Можно предположить, что высыпания зоны I были гораздо слабее высыпаний зоны II. В Южном полушарии такие профили не наблюдались.

ГИП и КИП также, как правило, разделялись по динамике обоих провалов. Для этого были тщательно рассмотрены все геомагнитные возмущения в течение рассмотренного периода. КИП образуется через несколько часов даже после небольшого роста активности. Он имеет тенденцию формироваться на долготах со слабым геомагнитным полем, где высыпания из магнитосферного кольцевого тока наиболее сильные [Karpachev, 2020]. Поэтому на долготах Америки он чаще всего наблюдается в Южном полушарии и реже всего в Северном. Таким образом, асимметрия полушарий определяется не только в положении всех структур, но и в вероятности наблюдения КИП.

Итак, построена на настоящий момент наиболее полная и адекватная картина структуры утренней (05–09 LT) ионосферы для высокой солнечной активности. При низкой солнечной активности ГИП в обоих полушариях утром расположен на  $\sim 2^\circ$  полярнее [Karpachev, 2019], чем при высокой активности. Если положение аврорального овала неизменно, это должно усугубить проблему разделения ГИП и ВИП. Проверку этого предположения можно рассматривать в качестве задачи для следующего этапа исследований.

Полученные результаты имеют большое значение при моделировании состояния ионосферы. При этом следует выделить два аспекта. С физической точки зрения разделение и классификация ионосферных провалов является важным и необходимым, поскольку разные провалы формируются совершенно разными процессами, происходящими в системе магнитосфера–ионосфера–термосфера. Поэтому у них разная динамика и во времени и в пространстве, которую необходимо понимать и учитывать при исследовании этих процессов. С точки зрения описания среды в задачах распространения радиоволн главным является расположение полярной стенки любого провала. На длинных высокоширотных трассах радиолуч наталкивается на полярную

стенку провала и переотражается от нее вверх, вдоль силовой линии [Blagoveschensky et al., 1997]. Поэтому, в этом случае важно определить географическое положение и состояние, в первую очередь высоту, полярной стенки каждого провала.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит за предоставленные данные разработчиков и операторов эксперимента CHAMP (Deutsches GeoForschungs Zentrum (GFZ)) и German Aerospace Center (DLR), а также проекта DMSP (Defense Meteorological Satellite Program). Данные CHAMP взяты на сайте (<http://op.gfz-potsdam.de/champ>), а данные DMSP на сайте (<https://dmsp.bc.edu/>).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Vorob'ev V.G., Yagodkina O.I.* Сезонные и суточные (UT) вариации положения границ авроральных высыпаний и полярной шапки // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 50. № 5. С. 625–633. 2010.
- *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. <https://doi.org/10.1029/JA084iA02p00489>
- *Berg L.E., Soraas F.* Observations suggesting weak pitch angle diffusion of protons // Scientific/Technical Report No. U1, by Department of Physics, University of Bergen, Norway. 1972.
- *Blagoveschensky D.V., Dobroselsky K.A., Malseva O.A.* Main ionospheric trough as a channel for MF propagation in the magnetosphere // Radio Sci. V. 32. № 4. P. 1377–1490. 1997. <https://doi.org/10.1029/97RS00249>
- *Grebowsky J.M., Tailo H.A., Lindsa J.M.* Location and source of ionospheric high latitude troughs // Planet. Space Sci. V. 31. № 1. P. 99–105. 1983. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(83\)90034-X](https://doi.org/10.1016/0032-0633(83)90034-X)
- *Karpachev A.T., Klimenko M.V., Klimenko V.V.* Longitudinal variations of the ionospheric trough position // Adv. Space Res. V. 83. № 2. P. 950–956. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.09.038>
- *Karpachev A.T.* Variations in the winter troughs' position with local time, longitude, and solar activity in the Northern and Southern hemispheres // J. Geophys. Res. V. 124. № 10. P. 8039–8055. 2019. <https://doi.org/10.1029/2019JA026631>
- *Karpachev A.T.* Dynamics of main and ring ionospheric troughs at the recovery phase of storms/substorms // J. Geophys. Res. V. 126. № 1. 2020. <https://doi.org/10.1029/2020JA028079>
- *Karpachev A.T.* Advanced separation and classification of ionospheric troughs in midnight conditions // Sci. Rep. V. 12. 13434. 2022a. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-17591-4>
- *Karpachev A.T.* Advanced classification of ionospheric troughs in the morning and evening conditions // Remote Sensing. V. 14. 4072. 2022b. <https://doi.org/10.3390/rs14164072>
- *Luan X., Wang W., Burns A., Solomon S., Zhang Y., Paxton L.J., Xu J.* Longitudinal variations of nighttime electron auroral precipitation in both the Northern and Southern hemispheres from the TIMED global ultraviolet imager // J. Geophys. Res. V. 116. A03302. 2011. <https://doi.org/10.1029/2010JA016051>
- *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. № 5. P. 315–343. 1983. [https://doi.org/10.1016/S0021-9169\(83\)80038-5](https://doi.org/10.1016/S0021-9169(83)80038-5)
- *Muldrew D.B.* F layer ionization troughs deduced from Alouette data // J. Geophys. Res. V. 70. № 11. P. 2635–2650. 1965. <https://doi.org/10.1029/JZ070i011p02635>
- *Rodger A.S., Moffett R.J., Quegan S.* The role of ion drift in the formation of ionisation troughs in the mid- and high-latitude ionosphere – a review // J. Atmos. Terr. Phys. V. 54. № 1. P. 1–30. 1992. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(92\)90082-V](https://doi.org/10.1016/0021-9169(92)90082-V)
- *Vorob'ev V.G., Yagodkina O.I., Katkalov Yu.V.* Auroral Precipitation Model and its applications to ionospheric and magnetospheric studies // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. V. 102. P. 157–171. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2013.05.007>
- *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. № 9. P. 1717–1722. 1997. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(97\)00578-4](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(97)00578-4)