

УДК 550.388.2

ДИНАМИКА АНОМАЛИИ МОРЯ УЭДДЕЛЛА И ГЛАВНОГО ИОНОСФЕРНОГО ПРОВАЛА В ЮЖНОМ ЛЕТНЕМ ПОЛУШАРИИ

© 2025 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 31.05.2024 г.

После доработки 16.07.2024 г.

Принята к публикации 25.07.2024 г.

Исследовано влияние аномалии моря Уэдделла на структуру ночной ионосферы в Южном летнем полушарии. Для этого использованы данные спутника CHAMP за январь 2003 г. при высокой солнечной активности и за январь 2008 г. при низкой солнечной активности. Данные относятся к интервалу местного времени 02–04 LT, когда происходит наиболее сильное увеличение электронной концентрации вследствие образования аномалии. На долготах 60–180° Е при высокой солнечной активности и 0–225° Е при низкой солнечной активности, где аномалия отсутствует, наблюдается главный ионосферный провал. Плазменный пик в ночной ионосфере, связанный с образованием аномалии моря Уэдделла, достигает 6 МГц при низкой и 10 МГц при высокой солнечной активности. Сильно развитый при высокой солнечной активности плазменный пик резко спадает к высоким широтам на экваториальной границе авроральных диффузных высыпаний, которая соответствует плазмопаузе. При слабо развитой аномалии становится заметным вклад диффузных высыпаний, поэтому плазменный пик расширяется к полюсу за счет этих высыпаний. Полярнее аномалии, на широтах аврорального овала, как правило, наблюдается высокоширотный провал. Экваториальнее аномалии часто образуется хорошо выраженный минимум электронной концентрации, который можно определить как субпровал. Показано, что в некоторых случаях субпровал связан с выносом ионосферной плазмы из летнего полушария в зимнее. Тогда в зимнем полушарии на сопряженных широтах образуется максимум концентрации. Субпровал гораздо чаще наблюдается при низкой солнечной активности, чем при высокой.

Ключевые слова: аномалия моря Уэдделла, провал ионизации, субпровал, авроральные диффузные высыпания

DOI: 10.31857/S0016794025010085, **EDN:** ADUWBP

1. ВВЕДЕНИЕ

На ионосферных станциях Halley Bay (75.6° S, 333.4° E, 65.8° GMLat) и Argentine Island (65.3° S, 295.7° E, 53.8° GMLat) впервые было обнаружено аномальное поведение f_oF_2 : во время декабрьского солнцестояния ночные значения сильно превышают дневные [Bellchambers and Piggott, 1958; Penndorf, 1965; Dudeney and Piggott, 1978]. По названию ближайшего моря этот эффект был назван “аномалия моря Уэдделла” (Weddell Sea Anomaly, WSA). Исследования характеристик WSA были позднее продолжены по данным эксперимента TOPEX/Poseidon для всех уровней солнечной активности и всех сезонов [Horvath and Essex, 2003; Horvath, 2006; Jee et al., 2009], по данным прямых измерений концентрации ионов

Ni на высоте спутника DMSP 850 км [Horvath and Lovell, 2009] и концентрации электронов Ne на высоте спутника CHAMP 400 км [Liu et al., 2010], а также по данным радиозатменных измерений в эксперименте COSMIC/Formosat [Burns et al., 2008; He et al., 2009; Lin et al., 2009]. Область аномалии была четко очерчена по данным спутников Интеркосмос-19 и CHAMP в работах [Карпачев и др., 2011 и Klimenko et al., 2015]. Во всех процитированных работах обсуждались и причины образования аномалий. Детальное исследование механизма образования аномалии по данным наземных станций и модели FLIP было проведено в недавней работе [Richards et al., 2018]. Главной причиной сильного повышения электронной концентрации ночью на широтах аномалии яв-

ляется действие нейтрального ветра при наличии высокой остаточной ионизации после “выключения” солнечного излучения.

Главный ионосферный провал (ГИП) был обнаружен и описан в пионерской работе Muldrew [1965]. В дополнение к ГИП Muldrew наблюдал еще один провал на более высоких широтах, который им был определен как высокоширотный ионосферный провал (ВИП). Оба провала многократно исследовались, результаты представлены в обзорах [Ahmed et al., 1979; Moffett and Quegan, 1983; Grebowsky et al., 1983; Williams and Jain, 1986; Rodger et al., 1992; Nilsson et al., 2005]. По мере исследования обоих провалов было обнаружено, что ВИП находится в пределах аврорального овала высыпаний [Grebowsky et al., 1983], а ГИП преимущественно располагается экваториальнее овала [Ahmed et al., 1979]. Однако ВИП, расположенный на максимально низкой широте, можно спутать с ГИП, который находится максимально высоко по широте. Поэтому для разделения ВИП и ГИП был предложен специальный метод, использующий модель аврорального овала [Vorobjev et al., 2013]. Эта модель была разработана с использованием данных спутников DMSP в Полярном геофизическом институте в Мурманске и доступна на веб-сайте (<http://arpm.pgia.ru>). Модель описывает зону I авроральных диффузных высыпаний на экваториальном крае аврорального овала и зону II диффузных высыпаний на его полярном крае. Было показано, что зона I обычно формирует полярную стенку ГИП, в то время как зона II формирует полярную стенку ВИП. Это ключевой фактор, позволяющий отличить ГИП от ВИП. Анализ наиболее эффективно проводить в рамках долготного эффекта, поскольку положение всех структур ионосферы зависит от долготы. Положение аврорального овала также зависит от долготы и определяется углом наклона диполя Земли [Карпачев, 2023]. Амплитуда долготных вариаций аврорального овала высыпаний составляет $\sim 2.5^\circ$.

ГИП наиболее ярко выражен в зимних ночных условиях. Однако ночью он достаточно хорошо проявляется и летом. В летнем Южном полушарии на динамике провала должна сильно сказаться аномалия моря Уэдделла. Проверить это предположение и является целью данного исследования.

2. ДАННЫЕ

В работе были использованы данные прямых измерений электронной концентрации N_e на спутнике CHAMP [Rother and Michaelis, 2019]. Данные были отобраны для 5–11 января 2003 г. при высокой солнечной активности ($F10.7 \sim 160$ sfu) и для 3–13 января 2008 г. при низкой солнечной актив-

ности ($F10.7 \sim 80$ sfu). Данные относятся к относительно спокойным периодам времени с $Kp \leq 4$. Спутник обращался практически на полярной орбите с наклоном 87° , высота орбиты составляла ~ 520 км в январе 2003 г. и ~ 360 км в январе 2008 г. Вариации N_e ниже представлены в терминах плазменной частоты f_p . Измерения проводились через $\sim 1^\circ$ по широте, что позволяет достаточно точно определять положения всех структур ионосферы. Данные спутника CHAMP находятся в свободном доступе на сайте (<https://isdc.gfz-potsdam.de/champ-isdc/>).

3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ В ЮЖНОМ ПОЛУШАРИИ

На рис. 1 приведено распределение f_p в Южном полушарии для 02–04 LT, полученное по данным CHAMP для высокой солнечной активности (ВСА) и низкой активности (НСА). Карты получены по данным для нескольких спокойных дней в январе 2003 г. и январе 2008 г. соответственно. Значения f_p намного выше при ВСА, чем при НСА, хотя при низкой активности спутник был ближе к максимуму слоя $F2$. Однако по структуре оба распределения похожи. В обоих случаях наблюдается сильное повышение электронной концентрации, связанное с образованием WSA: на долготах от 180° W до 70° E при ВСА и от 150° W до 70° E при НСА. Аномалия намного сильнее развита при ВСА. Штриховой кривой показано положение ГИП, определенное для 04 LT, но в зимних условиях. Вследствие усреднения данных летний ГИП четко проявляется на картах только на долготах 90° – 150° E при ВСА и на долготах 60° – 210° E при НСА. ВИП четко проявился только при ВСА на долготах 120° – 180° E. Таким образом, сравнение распределений электронной концентрации для высокой и низкой солнечной активности позволяет выявить и сходство, и разницу между ними. Более тонкие различия будут выявляться и обсуждаться ниже при детальном анализе.

4. ВАРИАЦИИ РАЗНЫХ СТРУКТУР В ЮЖНОМ ПОЛУШАРИИ ПРИ ВЫСОКОЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

На рис. 2 приведены долготные вариации разных структур летней ночной ионосферы в Южном полушарии. Были использованы данные спутника CHAMP для ВСА, полученные 6–10 января 2003 г. На рис. 3 приведены широтные профили f_p , полученные на разных долготах 7 января 2003 г. для спокойных геомагнитных условий (Kp изменялся от 1+ до 3-). Данные в области средних и высоких широт относятся к послепо-

луночной ионосфере в интервале 02–04 LT. Зоны авроральных диффузных высыпаний на рис. 2 заштрихованы.

Звездочками на рис. 2 показано положение пика N_e , связанного с WSA. Вертикальные линии показывают ширину этого пика, но только для

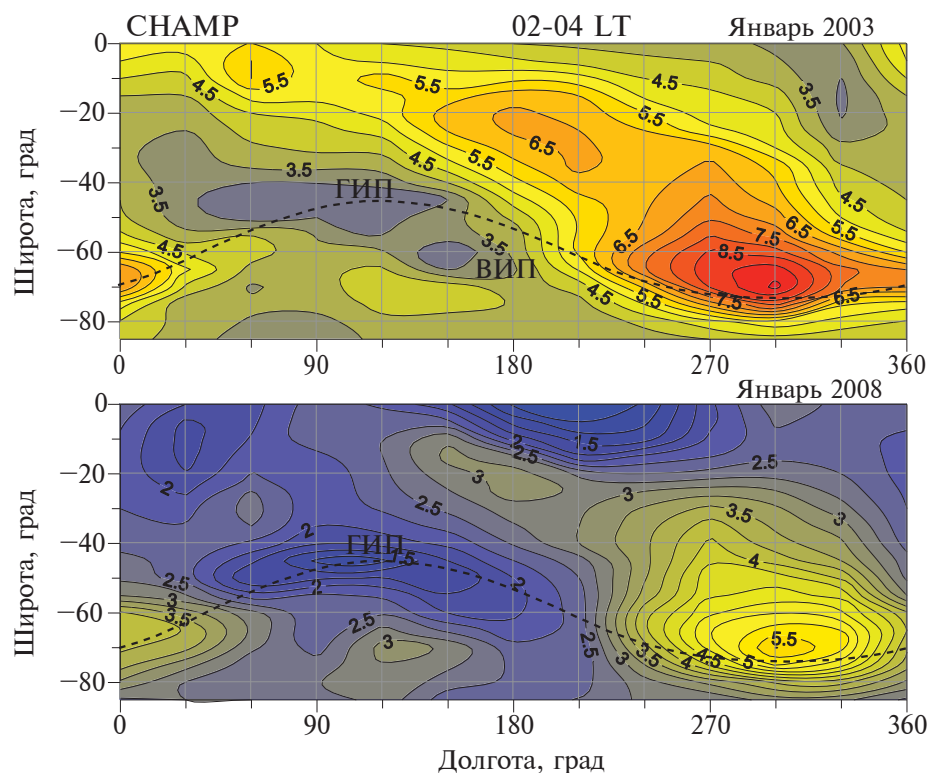


Рис. 1. Распределение плазменной частоты f_p по данным спутника ЧНАМР в Южном летнем полушарии в январе 2003 г. и январе 2008 г. Местное время 02–04 ч. Штриховой кривой показано положение минимума ГИП для 04 LT в зимних условиях.

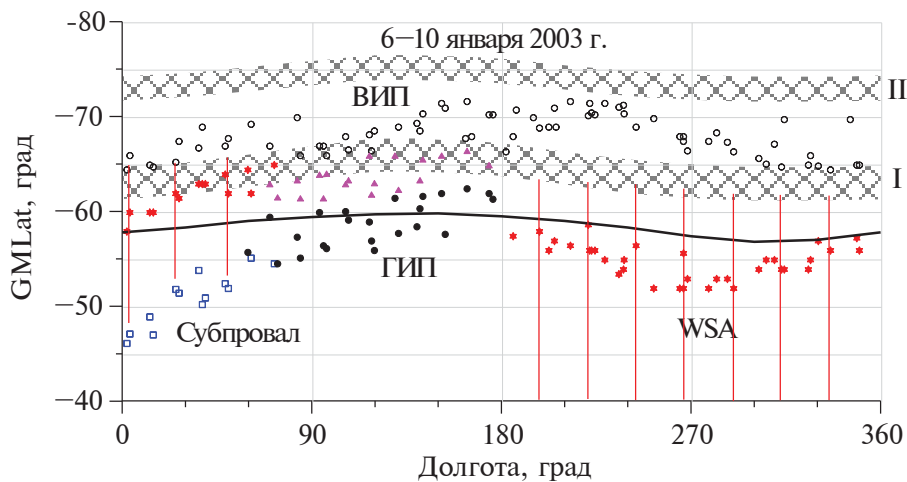


Рис. 2. Долготные вариации по данным ЧНАМР для высокой солнечной активности в январе 2003 г. положения ВИП (пустые кружки), ГИП (заполненные кружки), полярной стенки ГИП (треугольники), субпровала (квадраты), пика WSA (звездочки). Заштрихованы зоны I и II авроральных диффузных высыпаний согласно модели [Vogobjev et al., 2013]. Вертикальные линии представляют WSA для 7 января. Местное время 02–04 ч. Толстая кривая показывает положение ГИП для 04 LT, но в зимних условиях.

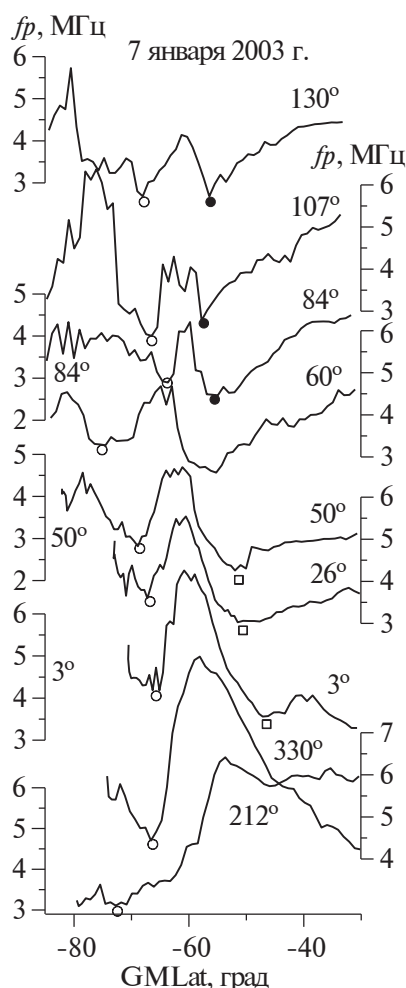


Рис. 3. Широтные разрезы f_p в разных долготных секторах, полученные по данным CHAMP 7 января 2003 г. Заполненные кружки – положение ГИП, пустые кружки – положение ВИП, квадраты – положение субпровала. Для удобства для трех осей Y слева указаны соответствующие долготные сектора.

7 января, чтобы не загромождать график. Заполненными кружками на рис. 2 обозначено положение ГИП. Под ГИП понимается структура, соответствующая классическому главному ионосферному провалу, т.е. достаточно глубокий минимум электронной концентрации на типичных широтах ГИП и полярная стенка на широтах высыпаний в зоне I. Полярная стенка ГИП обозначена треугольниками. Полярнее ГИП часто наблюдается высокоширотный провал, он обозначен пустыми кружками. ВИП как правило наблюдается внутри аврорального овала, его полярная стенка формируется диффузными высыпаниями в зоне II. Из рис. 2 видно, что классический ГИП зажат WSA по долготе с обеих сторон,

так что он наблюдается только в интервале долгот 60–180° E. Собственно говоря, это и есть главная особенность ночной летней ионосферы Южного полушария. Толстая кривая показывает положение зимнего ГИП также для 04 LT [Karpachev et al., 2019]. Видно, что положения летнего и зимнего провалов не сильно различаются. На малых долготах ГИП переходит в структуру, которая похожа на провал, но ее минимум расположен гораздо ниже по широте классического ГИП и соответственно экваториальной кромки аврорального овала. Определим эту структуру как субпровал. Субпровалы обозначены на рис. 2 квадратами. Они наблюдаются на рис. 3 на витках, которые соответствуют долготе 50, 26 и 3° E. Переход ГИП в субпровал происходит настолько незаметно, что его легко пропустить при анализе. Например, структуру на долготе 60° E на рис. 3 можно интерпретировать двояко, и как ГИП, и как субпровал. При этом переход полярная стенка ГИП как на долготе 84° E также незаметно переходит в плазменный пик на долготе 50° E, уже явно связанный с WSA. Из сказанного следует, что структуру ГИП/субпровал однозначно идентифицировать можно только в динамике, рассматривая всю картину в целом, как на рис. 2.

WSA начинает развиваться на долготах менее 60° E. На экваториальном крае аномалии как правило формируется субпровал. При дальнейшем уменьшении долготы наблюдений он становится все менее заметным и при переходе в Западное полушарие исчезает. WSA в Западном полушарии является доминирующей структурой, на рис. 2 она ограничена широтой –40°, на самом деле она простирается дальше к экватору, но в данном случае это не принципиально. Высокоширотный край WSA в Западном полушарии на удивление точно совпадает с экваториальной границей зоны I. Однако это вполне закономерно, поскольку граница высыпаний практически совпадает с плазмопаузой. Полярный ветер за пределами плазмопаузы выносит ионосферную плазму по силовым линиям геомагнитного поля вверх и далее в магнитосферу. Поэтому полярная граница WSA очень резкая. Затем электронная концентрация падает медленно и образует минимум ВИП. Его полярная стенка формируется высыпаниями в зоне II. На малых долготах в Восточном полушарии WSA ограничена не экваториальной, а полярной границей зоны I. Это объясняется тем, что на этих долготах WSA только начинает формироваться, так что на низком фоне уровня становится заметным эффект высыпаний. Иначе говоря, в данном случае полярный край плазменного пика формируется диффузными высыпаниями.

ВИП очень изменчивая структура, и по форме, и по положению, поэтому он практически не воспроизводится при усреднении данных и отражается на карте только в интервале долгот 120–180° Е. Точно так же субпровал отражается на карте вместе с ГИП только в интервале долгот 30–75° Е.

Динамика провалов и WSA в летнем Южном полушарии настолько сложная, что это приводит к противоречивым результатам при ее исследовании. Так, например, в работе [Aa et al., 2020] статистическая обработка данных спутника Swarm показала, что летний провал в Южном полушарии в среднем расположен на 1.4° экваториальнее зимнего. В работе [Yang et al., 2018] летний ГИП был выделен, как и следовало ожидать, только в интервале долгот 60–90° Е, но он оказался в среднем на 3° экваториальнее зимнего провала. Это очевидно связано с тем, что в обоих случаях в массиве данных оказался и субпровал, который занижил среднее положение ГИП. В работе [Lee et al., 2011] данные эксперимента COSMIC/Formosat рассматривались только вне зоны WSA, но среднее положение провала в 04 LT оказалось гораздо полярнее зимнего ГИП, на широтах 64–65°. Нетрудно определить на рис. 2, что это соответствует ВИП, а не ГИП.

На рис. 3 приведены широтные профили f_p , полученные на разных долготах 7 января 2003 г. Они практически обсуждались в процессе описания рис. 2. Отметим еще раз, насколько плавно плазменный пик, формирующий полярную стенку ГИП, поглощается плазменным пиком при образовании WSA. Отметим еще одну особенность на рис. 3. На самом нижнем профиле f_p , полученном на долготе 212° Е, электронная концентрация медленно спадает к высоким широтам, образуя неглубокий ВИП с очень низкой полярной стенкой. Такие широтные профили являются типичными в интервале долгот 150–250° Е. ВИП в этом интервале долгот максимально удален к полюсу. Это вероятно связано со спецификой высыпаний в зоне II в этом интервале долгот.

Для более полного понимания морфологии и причин формирования ночной летней ионосферы Южного полушария рассмотрим наиболее характерные широтные разрезы f_p — рис. 4. На рис. 4а приведены в сравнении два разреза — в нормальной и аномальной ионосфере. Разрезы были получены 9 января 2003 г. в долготных секторах 105° Е и 335° Е. На долготе 105° Е в нормальной ионосфере наблюдается классический ГИП, полярная стенка которого формируется высыпаниями в зоне I. ГИП сопровождается также четко выраженным ВИП, полярная стенка которого соответственно формируется высыпа-

ниями в зоне II. Положения зон высыпаний соответствуют долготе наблюдений и Kp -индексу. В аномальной ионосфере наблюдается чрезвычайно сильно выраженное повышение электронной концентрации, связанное с образованием WSA. Это повышение в максимуме достигает 9–10 МГц. Плазменный пик резко обрывается на широте плазмопаузы, несколько полярнее наблюдается минимум ВИП и еще дальше по широте расположена его полярная стенка. Таким образом, WSA полностью поглощает ГИП, но не влияет на ВИП, по крайней мере, сильно.

На рис. 4б приведен крайне характерный широтный профиль f_p , полученный 13 января 2003 г. на долготе 22° Е и сопряженный с ним профиль f_p , записанный в Северном полушарии практически для тех же самых условий (штриховая кривая). В Северном полушарии наблюдается классический ГИП с минимумом на широте 62°. В Южном полушарии на широтах провала, на этой же долготе 22° Е, начинает формироваться плазменный пик, связанный с WSA. Этот пик не настолько мощный, чтобы полностью поглотить ГИП, но он сдвигает минимум ГИП к полюсу. Этот минимум отмечен на рисунке 4 кружком. А экваториальнее WSA образуется субпровал на широте –50.5°, который отмечен квадратом. Отметим, что никакой специфический механизм для образования субпровала не был задействован — минимум электронной концентрации образуется просто потому, что концентрация растет и к экватору, и к полюсу.

На рис. 4в также приведены профили f_p в Южном и сопряженном Северном полушарии. В Северном полушарии ГИП расположен на широте 58°, которая соответствует долготе и Kp . В Южном полушарии на долготе 47° Е начинает формироваться аномалия, которая заполняет минимум ГИП. Вместо него образуется неглубокий минимум, отмеченный квадратом. Этот минимум расположен на широте –52°, что слишком низко для ГИП, поэтому он является субпровалом. В сопряженном Северном полушарии на этих широтах наблюдается небольшой пик электронной концентрации. Механизм образования такой сопряженной структуры хорошо известен — из летнего полушария с повышенным уровнем ионизации плазма вдоль магнитной силовой трубки перетекает в зимнее полушарие за счет диффузии [Кринберг и Тащилин, 1984]. Этот механизм наиболее эффективен для средних широт, где объем силовых трубок максимально способствует процессу перетекания ионосферной плазмы.

На рис. 4г также приведены сопряженные профили f_p , полученные 8 января 2003 г. в долготном секторе ~35° Е. В Северном полушарии наблюда-

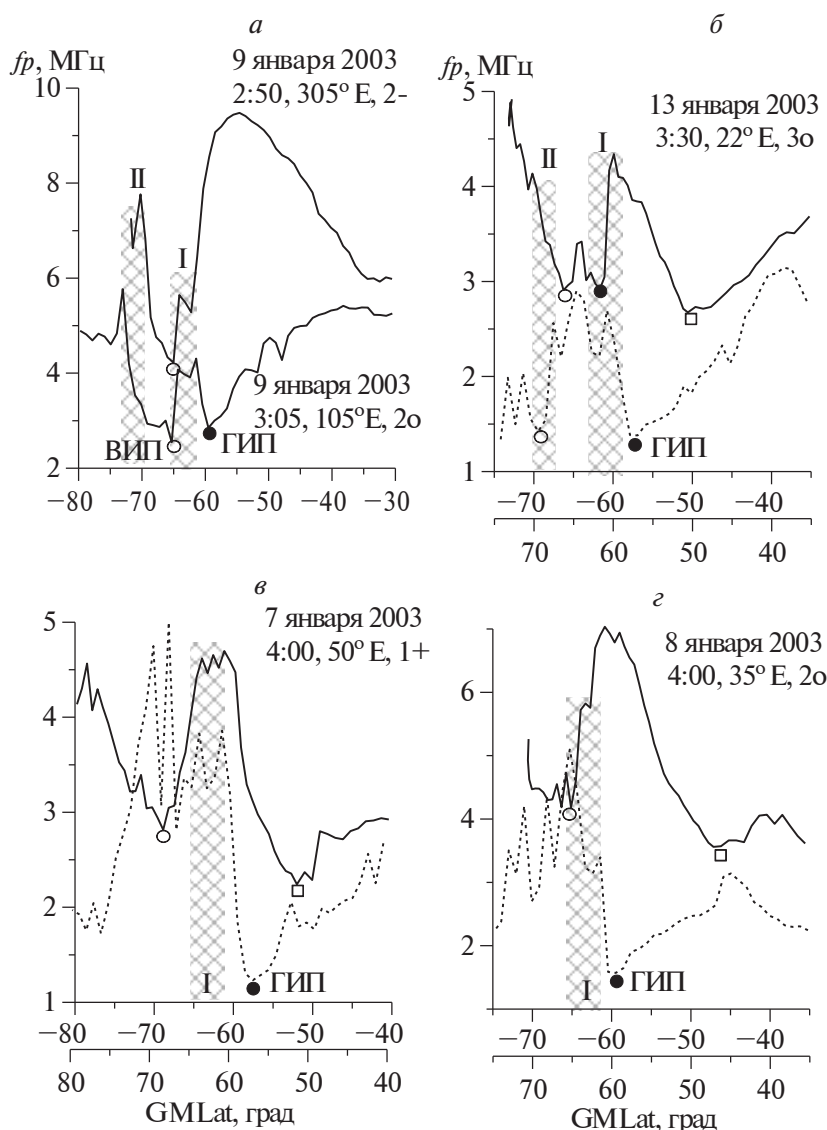


Рис. 4. Характерные широтные разрезы f_p для разных условий в Южном и Северном полушариях. Для каждого случая указаны дата, местное время, долгота и K_p -индекс. Штриховые кривые относятся к Северному полушарию. Положение ГИП отмечено заполненным кружком, ВИП – пустым кружком, субпровала – квадратом.

ется хорошо выраженный ГИП. В Южном полушарии WSA полностью заполняет ГИП. А на очень низких широтах $-(43-47^\circ)$ наблюдается минимум, снова сопряженный с плазменным пиком в Северном зимнем полушарии.

Таким образом, можно выделить две причины образования субпровала, который довольно регулярно наблюдается в интервале долгот $0-60^\circ$ E. Одна из них связана с перекачкой плазмы из летнего полушария в зимнее под действием диффузии. Вторая причина обусловлена резким ростом электронной концентрации к полюсу при образовании WSA и при наличии роста концентрации

к экватору. В свою очередь рост концентрации к экватору связан либо с гребнем экваториальной аномалии, либо с локальным максимумом N_e на низких широтах, который обычно наблюдается и после распада экваториальной аномалии [Карпачев, 2021].

5. ВАРИАЦИИ РАЗНЫХ СТРУКТУР В ЮЖНОМ ПОЛУШАРИИ ПРИ НИЗКОЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Рассмотрим ситуацию в Южном полушарии при низкой солнечной активности и выделим ее отличия от высокой солнечной активности. На

рис. 5 приведены долготные вариации структур Южного полушария, выделенные за период 3–11 января 2008 г. для НСА и спокойных геомагнитных условий. Данные относятся практически к такому же, как и на рис. 2, интервалу местного времени (03–04 LT). На рис. 6 показаны характерные для НСА широтные профили f_p . Рисунок 6а, аналогично рис. 4а, показывает широтные профили в нормальной и аномальной ионосфере. При НСА увеличение электронной концентрации ночью в области WSA достигает всего 6 МГц по сравнению с 10 МГц при ВСА. ГИП, наоборот, при НСА более ярко проявляется. Поэтому область существования классического ГИП при НСА шире, чем при ВСА и занимает интервал долгот 0–225° Е, как видно на рис. 5. Более слабое развитие WSA сказывается и на том, что полярная граница всех плазменных пиков на рис. 5 определяется диффузными высыпаниями, а не только на малых долготах, как при ВСА (рис. 2). Это связано с тем, что эффект высыпаний становится более заметным на низком фоновом уровне.

Однако главное отличие от ВСА состоит в наличии субпровалов в Западном полушарии. Причем субпровалы наблюдаются на гораздо более низких широтах, чем при ВСА. Два примера субпровала приведены на рис. 6б. Субпровал, зарегистрированный 11 января 2008 г. в долготном секторе 25° Е на широте –52°, подобен субпровалам, которые наблюдаются на малых долготах при ВСА. Субпровал, зарегистрированный в долготном секторе 323° Е, находится на очень низкой

широте –37°. Однако он достаточно четко выделяется, так что его невозможно не заметить при обработке данных. Тем более, если речь идет об автоматическом выделении провалов. Такая методика все чаще применяется в последнее время. Отметим, что субпровалов в Западном полушарии при ВСА нет по простой причине – они заполняются за счет более интенсивной солнечной ионизации. Но даже и при НСА субпровалы в Западном полушарии выражены не очень ярко.

Треугольниками на рис. 5 отмечено положение полярной стенки ГИП, сформированной в виде отдельного пика. Полярная стенка ГИП, как и обычно, связана с диффузными высыпаниями в зоне I. В интервале долгот 120–210° Е полярная стенка по-прежнему крутая, но на ее вершине наблюдается множество плазменных пиков, что затрудняет определение ее положения, и оно не отмечено на рис. 5.

Рисунок 6в полностью аналогичен рис. 4б. На рис. 6в приведен характерный широтный профиль f_p , полученный 5 января 2006 г. на долготе 22° Е и сопряженный с ним профиль f_p , записанный в Северном полушарии практически для тех же самых условий. В Северном полушарии наблюдается классический ГИП с минимумом на широте 62°. В Южном полушарии на этих широтах, наоборот, наблюдается плазменный пик, связанный с образованием WSA. Поскольку данные относятся к полуденным часам местного времени, WSA еще не сильно развита и плазменный пик не полностью поглощает ГИП. Однако этот

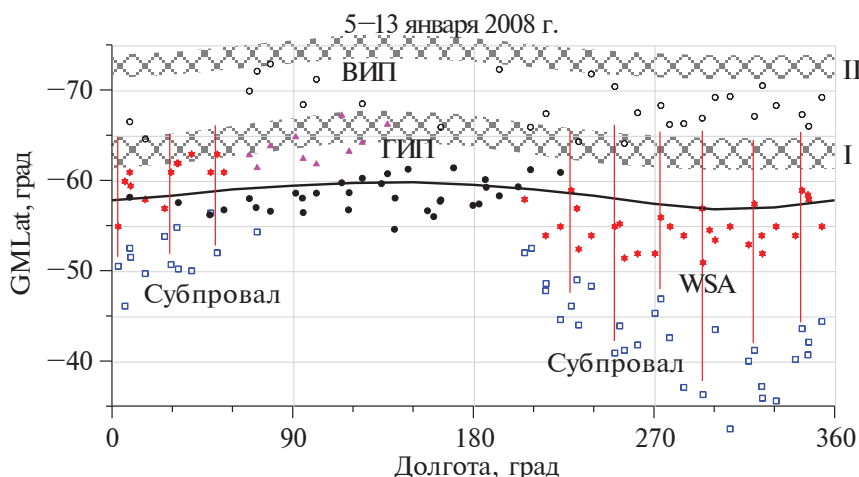


Рис. 5. Долготные вариации по данным CHAMP для низкой солнечной активности в январе 2008 г. положения ВИП (пустые кружки), ГИП (заполненные кружки), полярной стенки ГИП (треугольники), субпровала (квадраты), пика WSA (звездочки). Вертикальные линии представляют WSA для 10 января. Заштрихованы зоны I и II авроральных диффузных высыпаний согласно модели [Vorobjev et al., 2013]. Местное время 03–04 ч. Толстая кривая показывает положение ГИП для 04 LT, но в зимних условиях.

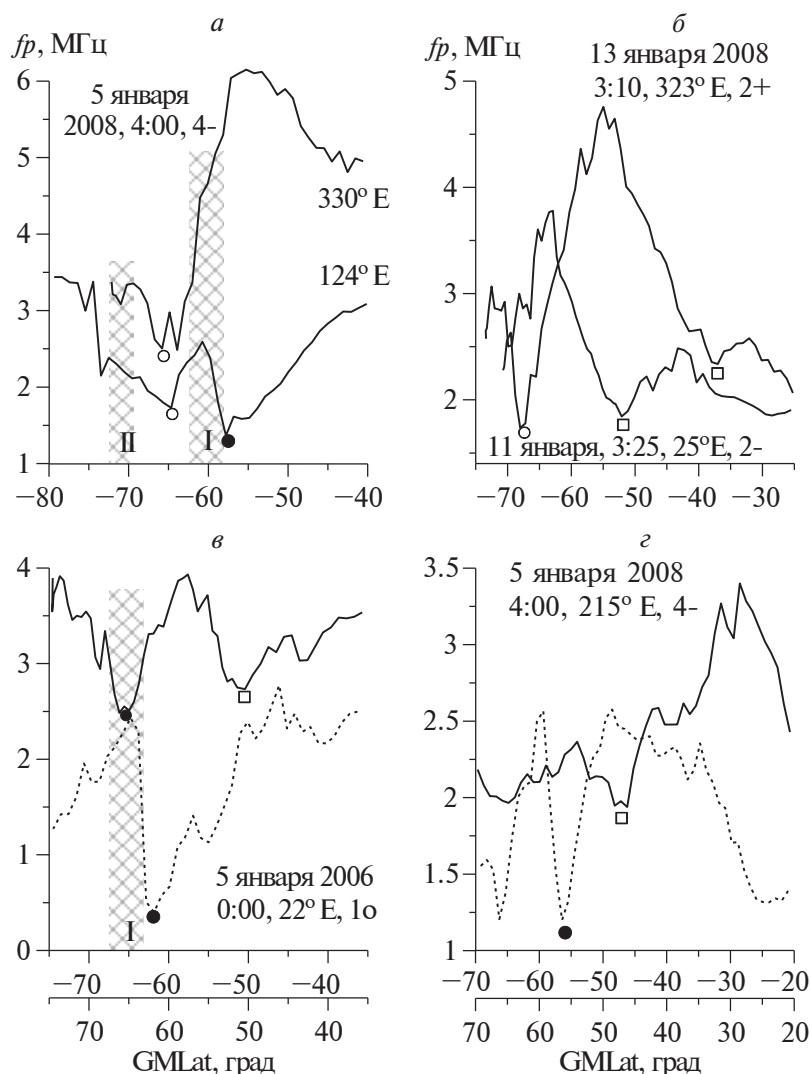


Рис. 6. Характерные широтные разрезы f_p для разных условий в Южном и Северном полушариях. Для каждого случая указаны дата, местное время, долгота и K_p -индекс. Штриховые кривые относятся к Северному полушарию. Положение ГИП отмечено заполненным кружком, ВИП – пустым кружком, субпровала – квадратом.

пик сдвигает минимум ГИП к полюсу, а также образует субпровал на широте -50.5° .

На рис. 6г приведены широтные профили f_p , полученные 5 января 2008 г. в долготном секторе 215° E. В Южном полушарии наблюдается четко выраженный субпровал на широте -47° . На этой же примерно широте в Северном полушарии наблюдается плазменный пик. Таким образом, механизм перекачки плазмы из летнего полушария в зимнее вполне эффективно работает и при низкой солнечной активности.

В работе [Horwath and Lowell, 2009] проводилось исследование провала и WSA по данным

спутника DMSP F15 для зимы 1996–1997, т.е. также для НСА. Полученные результаты можно сравнить с нашими. Плазмопауза, ГИП, пик WSA и субпровал по данным DMSP находились на широтах -62.5 , -57.5 , -56.2 и -42.5° соответственно. Это очень близко к тому, что наблюдается на рис. 5. Образование субпровала авторы связывали со стагнацией плазмы и влиянием Южно-атлантической магнитной аномалии. И отображали на рис. 6 своей статьи ГИП и субпровал единой ветвью, т.е. объединяли совершенно разные структуры в одно целое. Однако высокоширотный край магнитной аномалии едва достигает -35° GMLat, поэтому трудно согласиться с ее

участием в формировании субпровалов. Что касается стагнации ионосферной плазмы, то она имеет место на всех широтах и долготах в ночной ионосфере при отсутствии солнечной ионизации.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Противоречивые результаты, полученные по провалу ионизации в Южном летнем полушарии, свидетельствуют о непростой для анализа ситуации. Детальное рассмотрение структуры летней ночной (02–04 LT) ионосферы в Южном полушарии полностью подтвердило это предположение. Сложное поведение ионосферы в этих условиях определяется аномалией моря Уэдделла. Выделим основные положения проведенного анализа.

– Плазменный пик, связанный с образованием WSA, в 02–04 LT достигает 6 МГц при НСА и 10 МГц при ВСА.

– На долготах WSA этот пик полностью заполняет главный ионосферный провал. Поэтому ГИП наблюдается только вне WSA, на долготах 60–180° Е при ВСА и 0–210° Е при НСА.

– При ВСА хорошо развитый плазменный пик, связанный с WSA, резко спадает к полюсу на широте плазмопаузы. Эта широта практически совпадает с экваториальной границей авроральных диффузных высыпаний. При НСА плазменный пик, связанный с WSA, менее сильно развит, поэтому он расширяется к полюсу за счет диффузных высыпаний в зоне I. В результате объединенный пик оказывается ограниченным широтой полярной границы диффузных высыпаний в зоне I. Иначе говоря, полярная граница объединенного пика определяется степенью развития WSA. Границы авроральных диффузных высыпаний были определены по модели аврорального овала [Vorobjev et al., 2013].

– На экваториальной границе плазменного пика WSA часто образуется субпровал на широтах гораздо экваториальнее классического ГИП, вплоть до ~35° GMlat. При ВСА этот субпровал наблюдается только на долготах Восточного полушария 0–60° Е, а при НСА и в Западном полушарии. Субпровал, особенно в Западном полушарии, слабо выражен, находится гораздо экваториальнее ГИП, и, тем не менее, в некоторых работах его путают с ГИП. Поэтому его нельзя исключить из анализа.

– Причин образования субпровала, по-видимому, две. Первая и самая простая – минимум субпровала образуется при резком росте электронной концентрации к полюсу при формировании WSA, и к экватору – при наличии гребня экваториальной аномалии или его остатков. Вто-

рая причина связана с переносом электронной концентрации из летнего полушария в зимнее. Этот механизм хорошо известен.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит за предоставленные данные разработчиков и операторов эксперимента CHAMP (Deutsches GeoForschungs Zentrum (GFZ)) и German Aerospace Center (DLR). Данные CHAMP взяты на сайте (<https://isdc.gfz-potsdam.de/champ-isdc/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Кринберг И.А., Тащилин А.В. Ионосфера и плазмосфера. М.: Наука, 189 с. 1984.
- Карпачев А.Т., Гасилов Н.А., Карпачев О.А. Морфология и причины аномалии моря Уэдделла // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 51. № 6. С. 828–840. 2011.
- Карпачев А.Т. Суточные и долготные вариации экваториальной аномалии для зимнего солнцестояния по данным ИСЗ Интеркосмос-19 // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 61. № 1. С. 20–34. 2021. <https://doi.org/10.31857/S0016794021010065>
- Карпачев А.Т. Особенности структуры зимней утренней ионосферы высоких и средних широт // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 63. № 6. С. 788–797. 2023. <https://doi.org/10.31857/S0016794023600370>
- Aa E., Zou S., Erickson P.J., Zhang S.-R., Liu S. Statistical analysis of the main ionospheric trough using Swarm in situ measurements // J. Geophys. Res. – Space. V. 125. № 3. ID e2019JA027583. 2020. <https://doi.org/10.1029/2019JA027583>
- 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. – Space. V. 84. № 2. P. 489–498. 1979. <https://doi.org/10.1029/JA084iA02p00489>
- Bellchambers W.H., Piggott W.R. Ionospheric measurements made at Halley Bay // Nature. V. 182. № 4649. P. 1596–1597. 1958. <https://doi.org/10.1038/1821596a0>
- Burns A.G., Zeng Z., Wang W., Lei J., Solomon S.C., Richmond A.D., Killeen T.L., Kuo Y.-H. The behavior of the F2 peak ionosphere over the South Pacific at dusk during quiet summer conditions from COSMIC data // J. Geophys. Res. – Space. V. 113. № 12. ID A12305. 2008. <https://doi.org/10.1029/2008JA013308>
- Dudeney J.R., Piggott W.R. Antarctic ionospheric research / Upper Atmosphere Research in Antarctica / Antarctic Research Ser., 29. Eds. L.J. Lanzerotti, C.G. Park. Washington, DC: American Geophysical Union. P. 200–235. 1978. <https://doi.org/10.1029/AR029p0200>
- Grebowsky J.M., Tailor H.A., Lindsay 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)

- He M., Liu L., Wan W., Ning B., Zhao B., Wen J., Yue X., Le H. A study of the Weddell Sea Anomaly observed by FORMOSAT-3/COSMIC // J. Geophys. Res. – Space. V. 114. № 12 ID A12309. 2009. <https://doi.org/10.1029/2009JA014175>
- Horvath I., Essex E.A. The Weddell Sea Anomaly observed with the TOPEX satellite data // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. V. 65. № 6. P. 693–706. 2003. [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(03\)00083-X](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(03)00083-X).
- Horvath I. A total electron content space weather study of the nighttime Weddell Sea Anomaly of 1996/1997 southern summer with TOPEX/Poseidon radar altimetry // J. Geophys. Res. – Space. V. 111. № 12. ID A12317. 2006. <https://doi.org/10.1029/2006JA011679>
- Horvath I., Lovell B.C. Investigating the relationships among the South Atlantic Magnetic Anomaly, southern nighttime midlatitude trough, and nighttime Weddell Sea Anomaly during southern summer // J. Geophys. Res. – Space. V. 114. № 2. ID A02306. 2009. <https://doi.org/10.1029/2008JA013719>
- Jee G., Burns A.G., Kim Y.-H., Wang W. Seasonal and solar activity variations of the Weddell Sea Anomaly observed in the TOPEX total electron content measurements // J. Geophys. Res. – Space. V. 114. № 4. ID A04307. 2009. <https://doi.org/10.1029/2008JA013801>
- Karpachev A.T., Klimenko M.V., Klimenko V.V. Longitudinal variations of the ionospheric trough position // Adv. Space Res. V. 63. № 2. P. 950–966. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.09.038>
- Klimenko M.V., Klimenko V.V., Karpachev A.T., Rastovsky K.G., Stepanov A.E. Spatial features of Weddell Sea and Yakutsk Anomalies in foF2 diurnal variations during high solar activity periods: Interkosmos-19 satellite and ground-based ionosonde observations, IRI reproduction and GSM TIP model simulation // Adv. Space Res. V. 55. № 8. P. 2020–2032. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.12.032>
- Lee I.T., Wang W., Liu J.Y., Chen C.Y., Lin C.H. The ionospheric midlatitude trough observed by FORMOSAT-3/COSMIC during solar minimum // J. Geophys. Res. – Space. V. 116. № 6. ID A06311. 2011. <https://doi.org/10.1029/2010JA015544>
- Liu H., Thampi S.V., Yamamoto M. Phase reversal of the diurnal cycle in the midlatitude ionosphere // J. Geophys. Res. – Space. V. 115. № 1. ID A01305. 2010. <https://doi.org/10.1029/2009JA014689>
- Lin C.H., Liu J.Y., Cheng C.Z., Chen C.H., Liu C.H., Wang W., Burns A.G., Lei J. Three-dimensional ionospheric electron density structure of the Weddell Sea Anomaly // J. Geophys. Res. – Space. V. 114. № 2. ID A02312. 2009. <https://doi.org/10.1029/2008JA013455>
- 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>
- Nilsson H., Sergienko T.I., Ebihara Y., Yamauchi M. Quiet-time mid-latitude trough: influence of convection, field-aligned currents and proton precipitation // Ann. Geophys. V. 23. № 10. P. 3277–3288. 2005. <https://doi.org/10.5194/angeo-23-3277-2005>
- Penndorft R. The average ionospheric conditions over the Antarctic / Geomagnetism and Aeronomy: Studies in the Ionosphere, Geomagnetism and Atmospheric Radio Noise / Antarctic Research Ser., 4. Ed. A.H.Waynick. Washington, DC: American Geophysical Union. P. 1–45. 1965. <https://doi.org/10.1029/AR004p0001>
- Richards P.G., Meier R.R., Chen S., Dandenault P. Investigation of the causes of the longitudinal and solar cycle variation of the electron density in the Bering Sea and Weddell Sea anomalies // J. Geophys. Res. – Space. V. 123. № 9. P. 7825–7842. 2018. <https://doi.org/10.1029/2018JA025413>
- 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)
- Rother M., Michaelis I. CH-ME-2-PLPT - CHAMP Electron density and temperature time series in low time resolution (Level 2). GFZ Data Services. 2019. <https://doi.org/10.5880/GFZ.2.3.2019.007>
- Vorobjev 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jastp.2013.05.007>
- Williams P.J.S., Jain A.R. Observations of the high latitude trough using EISCAT // J. Atmos. Terr. Phys. V. 48. № 5. P. 423–434. 1986. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(86\)90119-4](https://doi.org/10.1016/0021-9169(86)90119-4)
- Yang N., Le H., Liu L., Zhang R. Statistical behavior of the longitudinal variations of the evening topside mid-latitude trough position in both northern and southern hemispheres // J. Geophys. Res. – Space. V. 123. № 5. P. 3983–3997. 2018. <https://doi.org/10.1029/2017JA025048>

Dynamics of the Weddell Sea Anomaly and Main Ionospheric Trough in the Southern Summer Hemisphere

A. T. Karpachev*

Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the Russian Academy of Sciences (IZMIRAN), Moscow, Troitsk, Russia

**e-mail: karp@izmiran.ru*

The impact of the Weddell Sea Anomaly on the structure of the nighttime ionosphere in the Southern summer hemisphere is considered in detail. For this purpose, data from the CHAMP satellite were used in January 2003 under high solar activity and in January 2008 under low solar activity. The data relate to the local time interval 02–04 LT, when the increase in electron density due to the formation of an anomaly is the strongest. At longitudes of 60–180° E under high solar activity and 0–210° E at low solar activity, where there is no anomaly, the main ionospheric trough is observed. The plasma peak in the nighttime ionosphere associated with the anomaly formation reaches 6 MHz under low solar activity, and 10 MHz under high solar activity. The strongly developed plasma peak decreases sharply to high latitudes at the equatorward border of auroral diffuse precipitation, which corresponds to the plasmopause. When the anomaly is weakly developed, the contribution of diffuse precipitation becomes noticeable, so that the plasma peak expands towards the pole due to this precipitation. Poleward of anomaly, the high-latitude trough is usually observed at latitudes of the auroral oval. A well-defined minimum of the electron density is often formed equatorward of Weddell Sea Anomaly, which can be defined as a sub-trough. Sometimes the sub-trough is created by the escape of ionospheric plasma from the summer hemisphere to the winter hemisphere. Then a density maximum is formed in the winter hemisphere at conjugate latitudes. Sub-trough is much more common under low solar activity than under high activity.

Keywords: Weddell Sea Anomaly, ionization trough, sub-trough, auroral diffuse precipitation