

ПОЛОЖЕНИЕ ПОЛЯРНОЙ СТЕНКИ ГЛАВНОГО ИОНОСФЕРНОГО ПРОВАЛА В МАГНИТОСПОКОЙНЫХ УСЛОВИЯХ ПО ДАННЫМ ИОНОСФЕРНОЙ СТАНЦИИ «ТИКСИ» И СПУТНИКОВ DMSP

POSITION OF THE MAIN IONOSPHERIC TROUGH POLAR WALL IN MAGNETICALLY QUIET CONDITIONS ACCORDING TO DATA FROM THE IONOSPHERIC TIXIE BAY STATION AND DMSP SATELLITES

А.Е. Степанов 

Институт космофизических исследований и аэрономии
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
Якутск, Россия, a_e_stepanov@ikfia.ysn.ru

В.Л. Халипов

Добровольный исследователь,
Якутск, Россия, khalipovvictor@mail.ru

A.E. Stepanov

Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research
and Aeronomy SB RAS,
Yakutsk, Russia, a_e_stepanov@ikfia.ysn.ru

V.L. Khalipov

Volunteer researcher,
Yakutsk, Russia, khalipovvictor@mail.ru

Аннотация. В работе рассматриваются экспериментальные данные о положении полярной стенки главного ионосферного провала в условиях низкой геомагнитной активности при $K_p=0-1$, полученные на Якутской цепочке ионозондов вертикального и наклонного зондирования. Северная граница провала в этих условиях наблюдается на высоких магнитных широтах 67–70°, что соответствует положению геофизической структуры “contracted oval”, или сжатый овал. Критические частоты на полярной кромке (стенке) провала имеют высокие значения порядка 6–8 МГц. В этот интервал времени спутником DMSP регистрируются интенсивные высыпания электронов 200–300 эВ, которые способны создать наблюдающую ионизацию в F-области ионосферы.

Ключевые слова: ионозонд, меридиональная цепочка, главный ионосферный провал, полярная стенка, магнитоспокойные условия, сжатый овал, электронная концентрация.

Abstract. The paper analyzes experimental data on the position of the polar wall of the main ionospheric trough under low geomagnetic activity at $K_p=0-1$ from measurements made at the Yakutsk chain of vertical and oblique sounding ionosondes. The northern boundary of the trough under these conditions shifts to high magnetic latitudes 67–70°. This corresponds to the position of the geophysical structure “contracted oval” or compressed oval. Critical frequencies at the polar wall of the trough have high values of about 6–8 MHz. At this time, the DMSP satellite records intense 200–300 eV electron precipitation that can create the observed ionization in the F-region of the ionosphere.

Keywords: ionosonde, meridional chain, main ionospheric trough, polar wall, magnetically quiet conditions, contracted oval, electron density.

ВВЕДЕНИЕ

Станции Якутской цепочки ионозондов оснащены высокопотенциальными горизонтальными ромбическими антеннами для наклонного зондирования ионосферы [Айзенберг, 1961; Мамруков и др., 1982]. Применение такой антенной системы, которая совмещена с антенной системой «вертикальный ромб», существенно увеличивает объем получаемой информации за счет расширения интервала зондируемых широт [Васильев и др., 1961; Мамруков, Зицкрайч, 1973; Бенькова и др., 1983; Мамруков, Филиппов, 1988]. Так, ст. «Тикси», магнитная широта (MLat) которой 65.1°, может уверенно принимать отражения от полярной кромки (стенки) главного ионосферного провала (ГИП), расположенного в спокойных геомагнитных условиях на магнитных широтах 67–75°.

Для локализации данных геофизических измерений по времени и пространству необходимо иметь мо-

дели границ полярной стенки ГИП для различных уровней геомагнитной возмущенности. Например, по данным спутника «Ореол-2» для вечернего сектора была построена модель экваториальной границы диффузной авроральной зоны, которая совпадает с полярной границей ГИП [Гальперин и др., 1977]. По измерениям за ряд лет на Якутской цепочке ионозондов нами была построена модель полярной стенки ГИП в утреннем секторе [Халипов и др., 1987]. В этой работе было установлено, что при малых уровнях возмущенности, например, при $K_p=0+$, северная граница ГИП смещается на магнитные широты 67–69°. На этих широтах и выше располагается так называемый *contracted oval*, или сжатый овал [Lui et al., 1976; Cummock et al., 2009; Despirak et al., 2018; Клейменова и др., 2023; Kleimenova et al., 2023]. В работе [Lui et al., 1976] показано, что в плазменном слое на магнитных силовых линиях, проектирующихся на широты сжатого овала, регистрируются значительные потоки

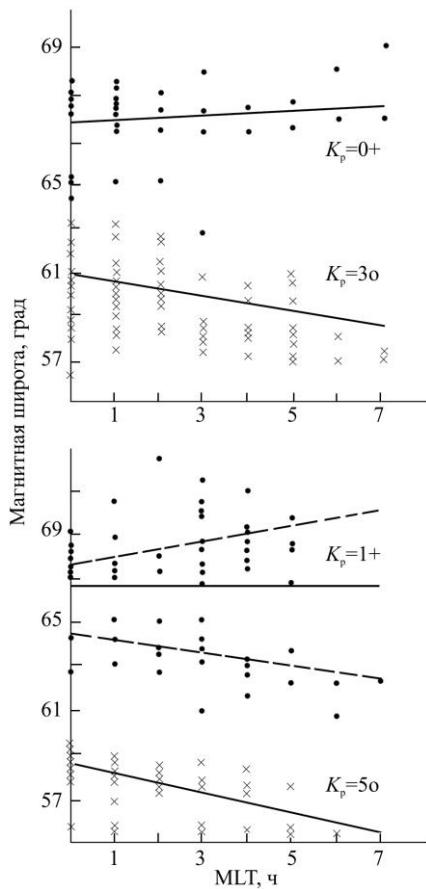


Рис. 1. Магнитная широта полярной стенки главного ионосферного провала в утреннем секторе MLT. Прямыми линиями показаны аппроксимирующие зависимости от K_p -индекса

энергичной плазмы. По измерениям спутников серии DMSP на ионосферных высотах наблюдаются интенсивные потоки вторгающихся электронов с энергиями сотни электрон-вольт в области сжатого овала [Cummock et al., 2009]. Особенности высокоширотных полярных суббури рассмотрены в работах [Despirak et al., 2018; Клейменова и др., 2023; Kleimenova et al., 2023]. Эти суббури имеют те же характеристики, что и на широтах аврорального овала, но магнитная активность локализована только в области высоких широт.

В настоящей работе мы анализируем события в очень спокойных геомагнитных условиях, когда полярная стенка ГИП все время располагалась на широтах ст. «Тикси» или севернее, и проводим сопоставление данной ионосферной структуры со структурой высыпаний энергичных частиц по одновременным измерениям на спутниках DMSP.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В работах [Гальперин и др., 1977; Халипов и др., 1977; Халипов и др., 1987] по данным спутника «Ореол-2» и высокоширотных ионосферных станций Якутской меридиональной цепочки было проанализировано положение полярной стенки ГИП в вечернем и утреннем секторах местного магнитного времени (MLT).

Поскольку географический меридиан, по которому определяется мировое время (UT), и меридиан

местного магнитного времени ст. «Тикси» почти совпадают (разница от ~18 до 40 мин, то можно считать, что для ст. «Тикси» время MLT и UT — это один и тот же интервал времени).

Как показали статистические исследования [Гальперин и др., 1977; Халипов и др., 1977; Халипов и др., 1987], проведенные по большому массиву данных, в утреннем секторе в очень спокойных геомагнитных условиях ($K_p=0-1$) положение полярной стенки ГИП характеризуется двумя ветвями, расходящимися к полюсу и экватору от общей для них линии аппроксимации. Это видно на рис. 1, приведенном в работе [Халипов и др., 1987]. Таким образом, в зависимости от внешних факторов (например, от величины компонент межпланетного магнитного поля B_y , B_x , B_z , скорости и плотности потока протонов солнечного ветра, которые входят в значение K_p неявным образом, но оказывают существенное влияние при столь малых K_p) граница полярной стенки ГИП перемещается со временем или к северу, или к югу от станции наблюдения. Такая ситуация показана на рис. 1 на примере измерений положения полярной стенки ГИП на ст. «Тикси» ($MLat=65.1^\circ$) при $K_p=1-$, т. е. в спокойных геомагнитных условиях [Халипов и др., 1987]. Согласно работе [Халипов и др., 1987] эмпирически магнитная широта полярной стенки ГИП при разных уровнях геомагнитной активности описывается следующим выражением:

$$MLat = \left(68.9 - 3.57 K_p + 0.29 K_p^2 \right) + \\ \left(0.21 - 0.25 K_p + 0.025 K_p^2 \right) MLT.$$

Рассмотрим пространственно-временную динамику полярной стенки ГИП в геомагнитно-спокойные периоды по наземным и спутниковым измерениям.

На левой панели рис. 2 приведена последовательность ионограмм возвратно-наклонного зондирования (ВНЗ) на ст. «Тикси» за спокойный день 9 декабря 1983 г., когда радиосигналы отражались от крупномасштабных неоднородностей ионосферы к северу от станции наблюдения. Ионограммы охватывают примерно 16-часовой интервал с 08:45 9 декабря 1983 г. до 00:15 UT следующего дня. Планетарные трехчасовые K_p -индексы в этот день составляли 2, 1, 0+, 0+, 0+, 1-, 1-, 0; $\Sigma K_p=5+$.

Заметим, что местная полночь на меридиане Тикси ($LT=UT+9$ ч) приходится на 15:00 UT.

Первые отражения от полярной стенки ГИП (F2s) и/или плазменных неоднородностей, присутствующие на ионограммах как дополнительные следы, были зарегистрированы в 08:45 UT (17:45 LT) на высоте (дальности) около 1100 км. При пересчете на дальность вдоль поверхности Земли такое отражение соответствует $MLat \sim 74^\circ$ (см. рис. 2). Далее отражение на ионограммах смещается вниз и в 13:45 UT регистрируется на высоте 400 км с частотой около 8 МГц. Дополнительные следы четко выражены и являются отражениями на критических частотах от неоднородностей, сформированных высыпаниями частиц в энергетическом диапазоне до ~1 кэВ, или мягкоэнергичными частицами [Гальперин и др., 1977; Rees, 1963; Белинская, Халипов, 1983]. В это же время

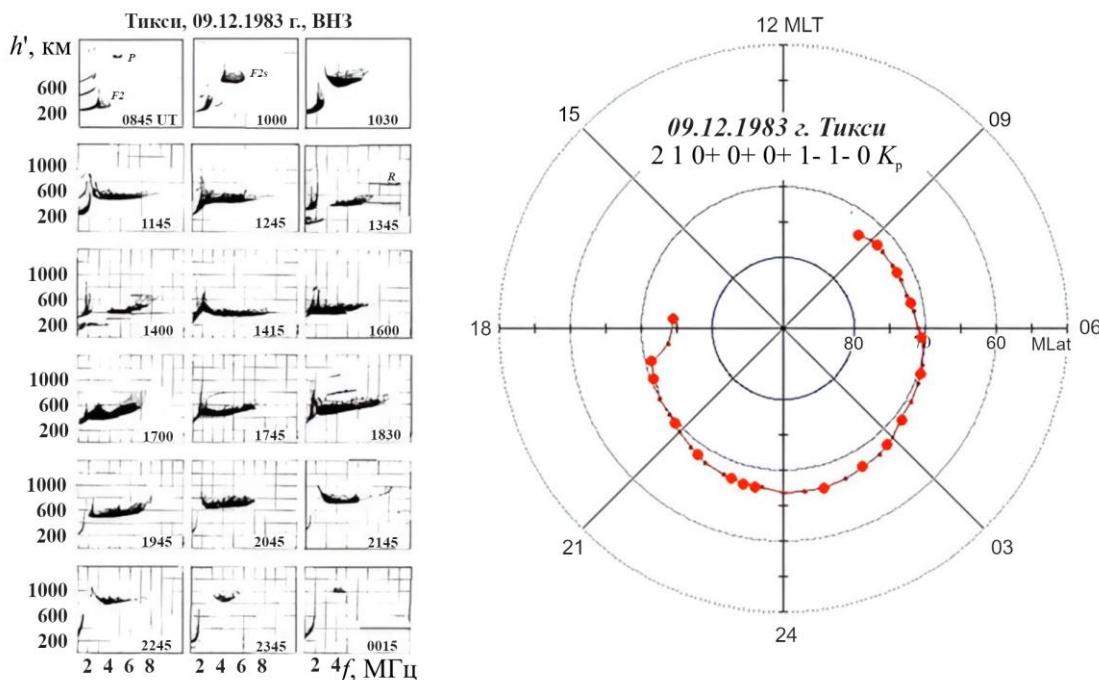


Рис. 2. Последовательность ионограмм возвратно-наклонного зондирования ионосферы ст. «Тикси» за 9 декабря 1983 г. (слева) и пространственно-временная динамика полярной стенки ГИП (справа) в этот же день

на ионограммах появляются следы (обозначены R) от дуг полярных сияний в области “contracted oval” — прямые многоярусные следы без заметного группового запаздывания вблизи предельных частот [Bates et al., 1966; Farley, 1963; Халипов и др., 1984]. Все зарегистрированные отражения от области F диффузны, без отчетливого разделения на о- и х-компоненты, с четким нижним краем следов. Такие следы на ионограммах характерны для наклонных отражений от полярной стенки ГИП [Халипов и др., 1977]. Критическая частота регулярного F2-слоя на ионограммах составляет от 1.5 до 4 МГц, высота слоя варьирует от 210 до 350 км. В 14:15 UT (23:45 LT) частота спорадических отражений достигает максимального значения ~ 10 МГц на высоте около 350 км, или на магнитной широте $\sim 68^\circ$. Далее дополнительные отражения (плазменные неоднородности) медленно начинают смещаться к северу и достигают магнитной широты $\sim 73^\circ$ в 00:30 UT (09:30 LT) следующего дня.

Алгоритм пересчета групповой дальности отражений на ионограммах в дальность D вдоль поверхности Земли приведен в работе [Мамруков и др., 1973], в которой расчеты траекторий коротких радиоволн проводились численным методом. Заметим, что в ряде работ при расчете траекторий коротких радиоволн в ионосфере использовались прямые численные пошаговые вычисления угла рефракции волн на малую величину 0.1° . В реальном высотном распределении электронной концентрации в виде слоя Чепмена ее изменения определяются экспонентой, где в показателе также экспонента. При этом волна при входе в слой испытывает слабую рефракцию, которая увеличивается по мере приближения к максимуму слоя. Выполнялось трассирование траектории радиоволны до области, где она становилась ортогональной к локальному магнитному полю,

и определялась дальность вдоль поверхности Земли до этой границы.

Таким образом, если вблизи точки, где луч становится ортогональным к магнитному полю, ионосфера заполнена неоднородностями, ориентированными вдоль поля и имеющими размер порядка длины волны, то происходит критическое отражение радиоволн от таких неоднородностей. Точность измерения дальности D колеблется в пределах ± 50 км (примерно полградуса широты).

На правой панели рис. 2 показана пространственно-временная динамика полярной стенки ГИП 9 декабря 1983 г. в координатах местное магнитное время — магнитная широта. Точками отмечено положение полярной стенки ГИП по данным возвратно-наклонного зондирования ионосферы на ст. «Тикси». Более крупными красными точками отмечены времена ионограмм, приведенных на левой панели.

Рассмотрим одновременные наземные и спутниковые измерения, проведившиеся 9 декабря 1983 г. На рис. 3 показаны пространственно-временная динамика полярной стенки ГИП по данным ст. «Тикси» (слева) и спектрограммы электронных и ионных высыпаний, полученные спутником DMSP-F6 (справа). Черным цветом на левой панели приведена часть траектории спутника, черная звездочка обозначает экваториальный край высыпаний электронов, который по одновременным наземным измерениям совпадает с полярной стенкой ГИП.

Черной звездочкой на спектрограммах (правая панель) обозначена полярная стенка ГИП на магнитной широте $\sim 69.1^\circ$. Такой же резкий край высыпаний виден и в утреннем секторе MLT (зеленая звездочка). Поскольку геофизическая ситуация носит стационарный характер, правомерно проводить сопос-

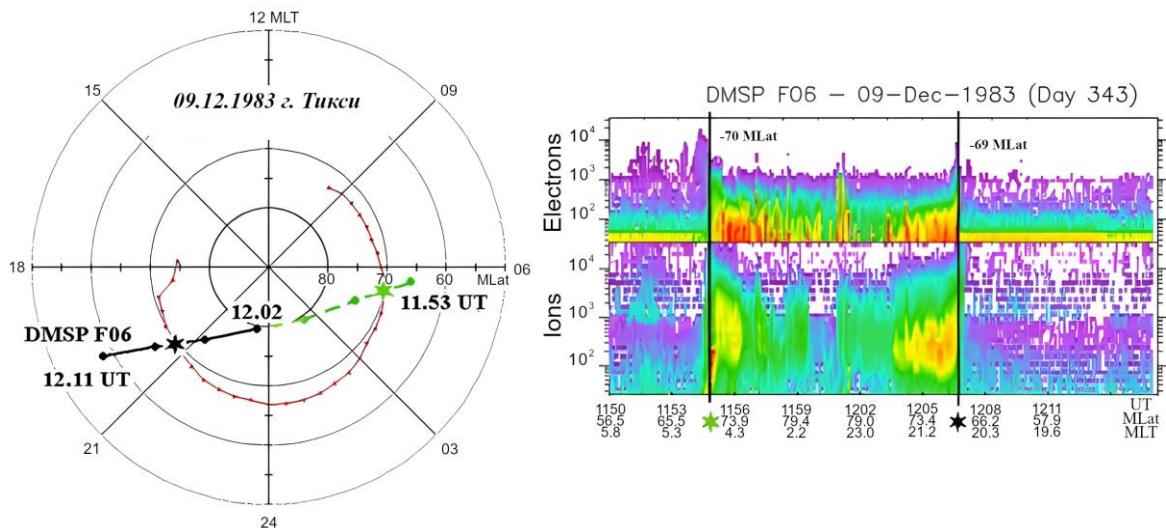


Рис. 3. Девятое декабря 1983 г.: траектория спутника DMSP-F06 в координатах MLat–MLT при пролете около 12 UT (слева) и спектрограммы электронных и ионных высыпаний (справа) за время пролета. Звездочки отмечают положение полярной кромки провала в вечернем (черная) и утреннем (зеленая) секторах

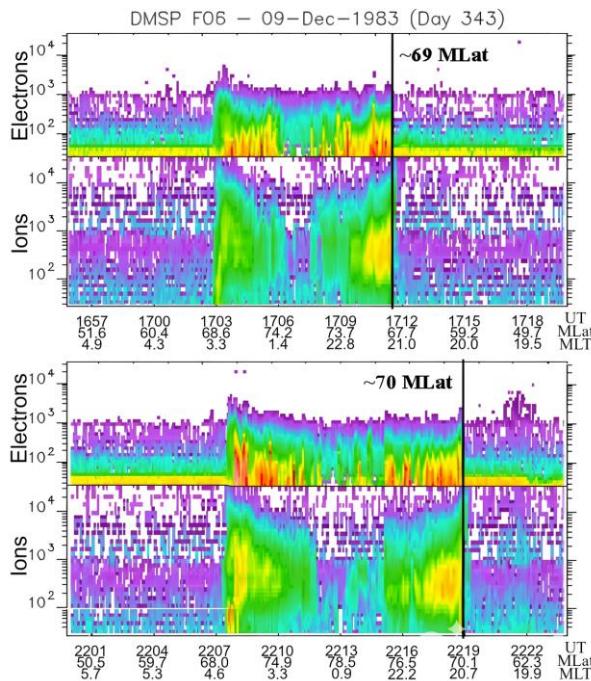


Рис. 4. Спектрограммы, записанные DMSP-F06 через ~5 (вверху) и 10 (внизу) часов соответственно после спектрограмм на рис. 3. Вертикальные черные прямые обозначают положение полярной стенки провала

тавление и для утреннего сектора. Из рис. 3 видно, что положение полярной стенки ГИП совпадает по наземным и спутниковым данным как в пространстве, так и по времени.

На рис. 4 приведены спектрограммы, записанные DMSP-F06 на 5 и 10 ч позже спектрограмм на рис. 3. Видно, что в этом случае экваториальная граница высыпания мягкоэнергичных частиц и/или полярная стенка ГИП остаются почти на той же широте. Это означает, что высыпания частиц не прекращаются и их интенсивность практически не меняется. В утреннем секторе MLT наблюдается такая же картина, как и в вечернем секторе: положение резких краев электронных и ионных высыпаний совпадает с положе-

нием четких отражений от ионосферных крупномасштабных неоднородностей.

Таким образом, полярная стенка ГИП и регистрируемые спутником DMSP-F6 высыпания мягкоэнергичных электронов в этот день пространственно совпадают и наблюдаются в течение около 15 ч.

В этот же день провел измерения над ст. «Тикси» еще один спутник — DMSP-F07 (рис. 5). Спутниковые и наземные измерения были синхронными вблизи местной полуночи. DMSP-F07 и наземная станция «Тикси» регистрируют соответственно электронные и ионные высыпания частиц и полярную стенку ГИП на одной и той же магнитной широте — около 67°. Синим цветом на рисунке показано продолжение траектории спутника в утреннем секторе MLT, где также видно совпадение границ ГИП и высыпаний частиц, т. е. и в этом случае наблюдается согласие данных спутниковых и наземных измерений.

Для следующего рассмотренного нами дня 4 декабря 2004 г. (рисунок не приводится), к сожалению, отсутствовали данные планетарного индекса K_p , но по данным SuperMAG [Gjerloev, 2009, 2012; Newell, Gjerloev, 2014] видно, что день был геомагнитно-спокойным. При пролете в раннем вечернем секторе (около 16:30 MLT) спутник DMSP-F13 зарегистрировал высыпания мягкоэнергичных электронов вблизи магнитной широты 72°. Полярная стенка ГИП наблюдалась со ст. «Тикси» с 21:00 LT (12:00 UT) до 08:00 утра на магнитных широтах 67–72°. Таким образом, и в этом случае наблюдение полярной стенки ГИП в течение продолжительного времени имело место в спокойных геомагнитных условиях.

Двадцать четвертого декабря 2004 г. (рис. 6) геомагнитная обстановка также была спокойной: трехчасовые индексы K_p составляли 1-, 0, 0+, 0+, 1, 2, 1-, 1+; $\Sigma K_p = 6+$. Спутники DMSP-F15 и F16A пересекли полярную стенку ГИП в 18–19 MLT. К сожалению, мы не сможем показать картину высыпаний в утреннем секторе, поскольку траектории спутников его не пересекали, но при наземных измерениях полярная

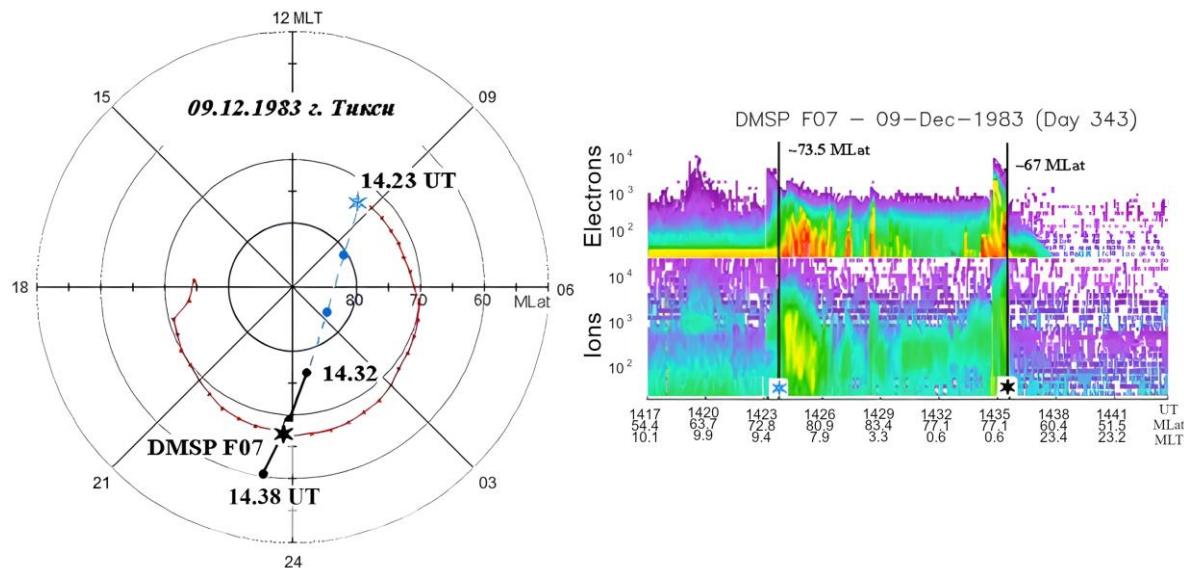


Рис. 5. Девятое декабря 1983 г.: траектория спутника DMSP-F07 в координатах MLat–MLT (справа) и спектрограммы электронных и ионных высыпаний (слева) за время пролета

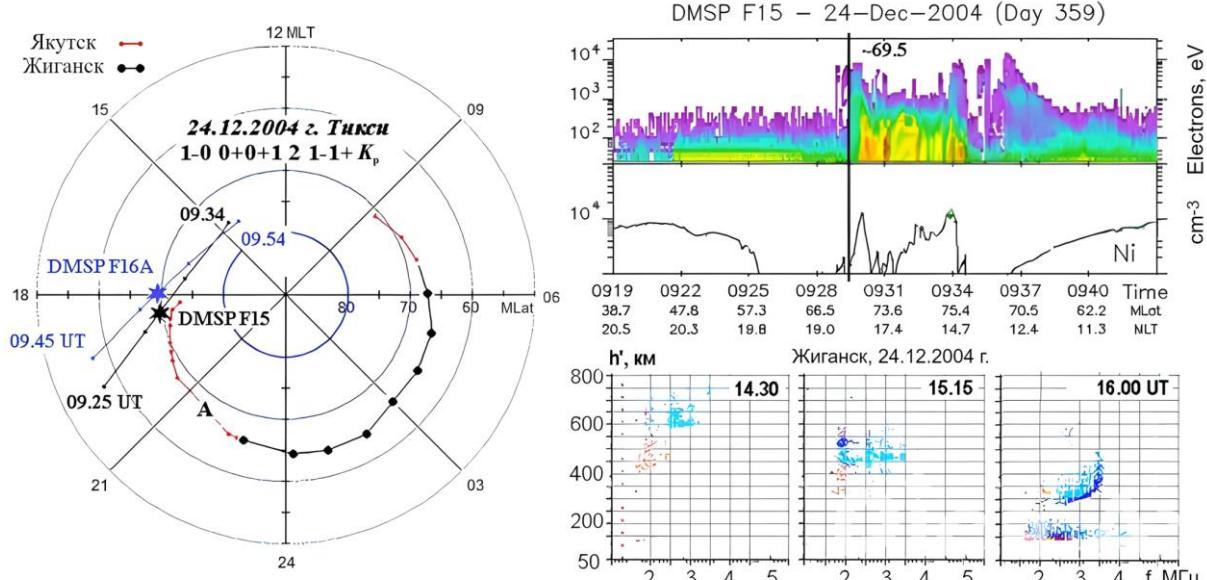


Рис. 6. Двадцать четвертого декабря 2004 г.: слева — траектории спутников DMSP-F15 и -F16A и положение полярной стенки ГИП по измерениям на станциях «Тикси» (красные точки) и «Жиганск» (черные точки) в координатах MLat–MLT; справа — спектрограмма электронных высыпаний и вариации плотности ионов (вверху), а также ионограммы ст. «Жиганск», регистрирующие полярную стенку ГИП (внизу). Черная вертикальная прямая на спектрограмме отмечает экваториальный край электронных высыпаний

стенка ГИП наблюдалась до 9 LT. В вечернем секторе полярная стенка ГИП наблюдалась по данным ст. «Тикси» до 22:30 LT (красные точки на рис. 6). Далее на ст. «Тикси» до 06:00 LT регистрируются отражения только от слоя E, т. е. формируется так называемое условие А — экранировка вышележащего F-слоя нижележащим E-слоем [Руководство URSI..., 1977; Инструкция..., 1985]. На ионограммах ст. «Тикси» следы F₂_s-отражений от полярной стенки ГИП вновь наблюдаются после 6 LT, когда рост высоты отражений однозначно говорит о движении этой структуры на север.

С 22:30 LT полярную стенку ГИП начинает наблюдать станция вертикального зондирования «Жи-

ганск» (черные кружки на левой панели рис. 6). Полярная стенка всю ночь наблюдается севернее ст. «Жиганск», а в утренние часы смещается к высоким магнитным широтам. Справа на рисунке приведены спектрограмма электронных высыпаний и вариации плотности ионов (вверху), а также ионограммы ст. «Жиганск» (внизу), регистрирующие дополнительные следы отражений от северного квадранта радиозондирования. Красный цвет отражений на ионограммах означает приход радиосигналов с зенита станции наблюдения, тогда как голубой цвет отражений означает приход радиосигналов с северных квадрантов.

По ионограммам ст. «Жиганск» видно, что в 14:30 UT дополнительные отражения, обозначен-

ные голубым цветом (приходящие с северной стороны), регистрируются на высоте ~ 590 км, что при пересчете на земную дальность примерно соответствует широте ст. «Тикси». Следующие две ионограммы показывают, что отраженные сигналы продолжают приходить с северной стороны, но область их отражения приближается к станции наблюдения.

ОБСУЖДЕНИЕ

Полярная стенка главного ионосферного провала совпадает с экваториальной границей электронных высыпаний [Халипов и др., 1977]. Спектральное распределение электронов в диффузной авроральной зоне приведено в работе [Белинская, Халипов, 1983], где для него рассчитан высотный профиль концентрации в F-области ионосферы. Наземные ионосферные измерения, а также измерения со спутников DMSP-F6, -F7, -F15 и -F16A, проведенные 9 декабря 1983 г., 4 и 24 декабря 2004 г. в геомагнитно-спокойные периоды в области “contracted oval”, регистрируют значительные потоки высыпающихся электронов (см. рис. 3–6). Максимум спектрального распределения переходит от сотен электрон-вольт до 1 кэВ. Частицы с такой энергией способны создавать значительную ионизацию в F-области ионосферы. Во всех случаях одновременных спутниковых и наземных измерений полярная стенка ГИП совпадает с экваториальной границей высыпаний частиц.

Детальные характеристики высыпающихся электронов в столь же спокойных геомагнитных условиях по измерениям на спутнике DMSP-F13 изучались в работе [Cummock et al., 2009]. Вторжения частиц наблюдаются не только в области “contracted oval”, но и в области полярной шапки. Измерения на этом же спутнике аврорального свечения в ультрафиолетовой части спектра дополняют пространственно-временную картину развития авроральных структур. Интегральный поток мягкоэнергичных электронов составляет 10^9 эВ/(см 2 с ср). Приведенные в нашей работе данные спутников DMSP хорошо согласуются с этими результатами.

В спектре электронов в диффузной авроральной зоне наряду с мягкоэнергичной компонентой присутствуют электроны с энергией до нескольких кэВ. Для такого спектрального распределения в работе [Белинская, Халипов, 1983] выполнены расчеты профилей ионизации в ионосфере, которые показывают, что в F-области электронная концентрация возрастает до $\sim(2\div3)\cdot10^4$ см $^{-3}$ ($f=4\div5$ МГц). Однако по измерениям на широтах “contracted oval” потоки электронов в мягкоэнергичной части спектра в диффузной авроральной зоне значительно выше. Это создает наблюдаемый уровень концентрации $\sim(4\div8)\cdot10^4$ см $^{-3}$ ($f=6\div8$ МГц) на полярной стенке ГИП в спокойных геомагнитных условиях.

Можно заключить, что в геомагнитно-спокойные периоды полярная стенка ГИП достаточно часто регистрируется с помощью ионозондов/дигизондов, расположенных в высоких широтах. При этом открытый остается вопрос о механизмах генерации таких долговременных высыпаний из хвоста магнитосферы в полярную ионосферу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Прямые сопоставления наземных ионозондовых измерений и спутниковых данных о высыпающихся электронах и ионах в спокойных геомагнитных условиях показали:

- Положение полярной стенки главного ионосферного провала по наземным данным хорошо согласуется с положением экваториальной границы высыпаний мягкоэнергичных частиц по измерения со спутников DMSP в области “contracted oval”.
- Интенсивность потоков вторгающихся частиц достаточно высока, чтобы вызвать повышение ионизации F2-области до уровня, который регистрируется наземным ионозондом.
- Область высыпаний, формирующая полярную стенку главного ионосферного провала, существует в течение многих часов в ночном секторе. Такое поведение в спокойных геомагнитных условиях вызывает вопросы об источниках высыпаний мягкоэнергичных частиц в высоких широтах.
- По спектру и интенсивности потоков электронов, которые наблюдаются на полярной стенке ионосферного провала в очень спокойных геомагнитных условиях, можно сделать вывод об их сходстве с популяцией частиц в дневном полярном каспе.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 25-17-20002).

Авторы благодарят Национальный геофизический центр данных NOAA/NESDIS за предоставление данных спутников DMSP, а также Мировой центр данных по геомагнетизму в Киото [<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>] и Мировое агентство SuperMAG [<https://supermag.jhuapl.edu/info/>] за представление данных по индексам геомагнитной активности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Айзенберг Г.З. *Коротковолновые антенны*. М.: Связьиздат, 1962, 110 с.
- Белинская С.И., Халипов В.Л. Некоторые аэрономические эффекты в диффузной зоне сияний. *Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца*. 1983, вып. 63, с. 116–124.
- Бенькова Н.П., Зикрач Э.К., Козлов Е.Ф. и др. Главный ионосферный провал по данным меридиональных цепочек зондов. *Ионосферные исследования*. 1983, т. 35, с. 5–12.
- Васильев Г.В., Васильев К.Н., Гончаров Л.П. Автоматическая панорамная ионосферная станция типа АИС. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1961, т. 1, № 1, с. 120–125.
- Гальперин Ю.И., Кранье Ж., Лисаков Ю.В. и др. Диффузная авроральная зона. I. Модель экваториальной границы диффузной зоны вторжения авроральных электронов в вечернем и околополуночном секторах. *Космические исследования*. 1977, т. 15, № 3, с. 421–434.
- Инструкция по обработке ионограмм наклонного зондирования. Под ред. Виноградовой Ю.В. Л.: Гидрометеоиздат, 1985, 127 с.
- Клейменова Н.Г., Громова Л.И., Деспирак И.В. и др. Особенности полярных суббурь: анализ отдельных событий. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2023, т. 63, № 3, с. 327–339.
- Мамруков А.П., Зикрач Э.К. Морфология субаврорального F2s. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1973, т. 13, с. 433–436.

- Мамруков А.П., Филиппов Л.Д. Якутская меридиональная цепочка ионозондов ВЗ и ВНЗ и круглосуточные наблюдения на ней главного ионосферного провала. Эффекты высыпания заряженных частиц в верхней атмосфере. Якутск: ЯФ СО АН СССР. 1988, с. 107–123.
- Мамруков А.П., Халипов В.Л., Филиппов В.М. Расчет ионограмм для ракурсно-чувствительных отражений от ионосферы. Геофизические явления в полярной области. Якутск. Изд. ЯФ СО АН СССР. 1973, с. 92–97.
- Мамруков А.П., Киселев В.А., Неустроев Е.М., Филиппов Л.Д. Совмещенный ионозонд ВЗ и ВНЗ для диагностики ионосферы на широтах плазмопаузы в Жиганске. Бюлл. научн.-техн. информации. Проблемы космофизики и аэрономии. Якутск: ЯФ СО АН СССР. 1982, с. 24–27.
- Руководство URSI по интерпретации и обработке ионограмм: пер. с англ.; отв. ред. Н.В. Медникова. М.: Наука, 1977, 342 с.
- Халипов В.Л., Гальперин Ю.И., Лисаков Ю.В. и др. Диффузная авроральная зона. II. Формирование и динамика полярного края субаврорального ионосферного провала в вечернем секторе. Космические исследования. 1977, т. 15, № 5, с. 708–724.
- Халипов В.Л., Голенков Е.В., Молочушкин Н.Е., Степанов А.Е. Характерные следы на ионограммах ВНЗ при появлении дуг сияний. Бюлл. научн.-техн. информации. Проблемы космофизики и аэрономии. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1984, с. 33–35.
- Халипов В.Л., Степанов А.Е., Новопашина Е.Ю. Модель положения полярной кромки ионосферного провала в утреннем секторе. Геомагнетизм и аэрономия. 1987, т. 27, № 5, с. 842–843.
- Bates H.F., Belon A.E., Romick G.J., Stringer W.J. On the correlation of optical and radio auroras. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1966, vol. 28, pp. 439–442. DOI: [10.1016/0021-9169\(66\)90053-5](https://doi.org/10.1016/0021-9169(66)90053-5).
- Cummock J.A., Blomberg L.G., Kullen A., et al. Small-scale characteristics of a extremely high latitude aurora. *Ann. Geophys.* 2009, vol. 27, pp. 3335–3341. DOI: [10.5194/angeo-27-3335-2009](https://doi.org/10.5194/angeo-27-3335-2009).
- Despirak I.V., Lubchich A.A., Kleimenova N.G. High-latitude substorm dependence on space weather conditions in solar cycle 23 and 24 (SC23 and SC24). *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2018, vol. 177, pp. 54–62.
- DOI: [10.1016/j.jastp.2017.09.011](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.09.011).
- Farley D.T., Jr. A plasma instability resulting in field-aligned irregularities in the ionosphere. *J. Geophys. Res.* 1963, vol. 68, pp. 6083–6097. DOI: [10.1029/JZ068i022p06083](https://doi.org/10.1029/JZ068i022p06083).
- Gjerloev J.W. A Global Ground-Based Magnetometer Initiative. *EOS*. 2009, vol. 90, pp. 230–231.
- DOI: [10.1029/2009EO270002](https://doi.org/10.1029/2009EO270002).
- Gjerloev J.W. The SuperMAG data processing technique. *J. Geophys. Res.* 2012, vol. 117, A09213.
- DOI: [10.1029/2012JA017683](https://doi.org/10.1029/2012JA017683).
- Kleimenova N.G., Despirak I.V., Malyshева L.M., et al. Substorms on a contracted auroral oval. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2023, vol. 245, p. 106049.
- DOI: [10.1016/j.jastp.2023.106049](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2023.106049).
- Lui A.T.Y., Akasofu S.-I., Hones E.W., et al. Observation of plasma sheet during a contracted oval substorm in a prolonged quiet period. *J. Geophys. Res.* 1976, vol. 81, pp. 1415–1419. DOI: [10.1029/JA081i007p01415](https://doi.org/10.1029/JA081i007p01415).
- Newell P.T., Gjerloev J.W. Local geomagnetic indices and the prediction of auroral power. *J. Geophys. Res.* 2014, vol. 119, pp. 9790–9803. DOI: [10.1002/2014JA020524](https://doi.org/10.1002/2014JA020524).
- Rees M.H. Auroral ionization and excitation by incident energetic electrons. *Planetary and Space Science*. 1963, vol. 11, no. 10, pp. 1209–1218. DOI: [10.1016/0032-0633\(63\)90252-6](https://doi.org/10.1016/0032-0633(63)90252-6).
- URL: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp> (дата обращения 3 сентября 2025 г.).
- URL: <https://supermag.jhuapl.edu/info/> (дата обращения 3 сентября 2025 г.).
- Как цитировать эту статью:*
- Степанов А.Е., Халипов В.Л. Положение полярной стенки главного ионосферного провала в магнитоспокойных условиях по данным ионосферной станции «Тикси» и спутников DMSP. Солнечно-земная физика. 2025, т. 11, № 4, с. 64–70. DOI: [10.12737/szf-114202506](https://doi.org/10.12737/szf-114202506).