

## 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 космических исследований и аэронауки  
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  $67-70^\circ$ , 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 наблюдаемую 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  $67-70^\circ$ . 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, Зикрач, 1973; Бенькова и др., 1983; Мамруков, Филиппов, 1988]. Так, ст. «Тикси», магнитная широта (MLat) которой  $65.1^\circ$ , может уверенно принимать отражения от полярной кромки (стенки) главного ионосферного провала (ГИП), расположенного в спокойных геомагнитных условиях на магнитных широтах  $67-75^\circ$ .

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  $67-69^\circ$ . 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

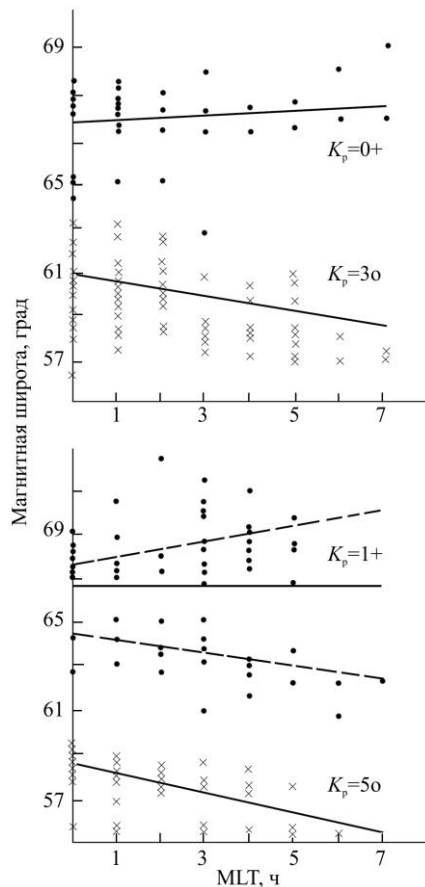


Рис. 1. Магнитная широта полярной стенки главного ионосферного провала в утреннем секторе MLT. Прямые линии показаны аппроксимирующие зависимости от  $K_p$ -индекса

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 суббур 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°) 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:

$$\text{MLat} = (68.9 - 3.57 K_p + 0.29 K_p^2) + (0.21 - 0.25 K_p + 0.025 K_p^2) \text{MLT}.$$

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 ~ 74° (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

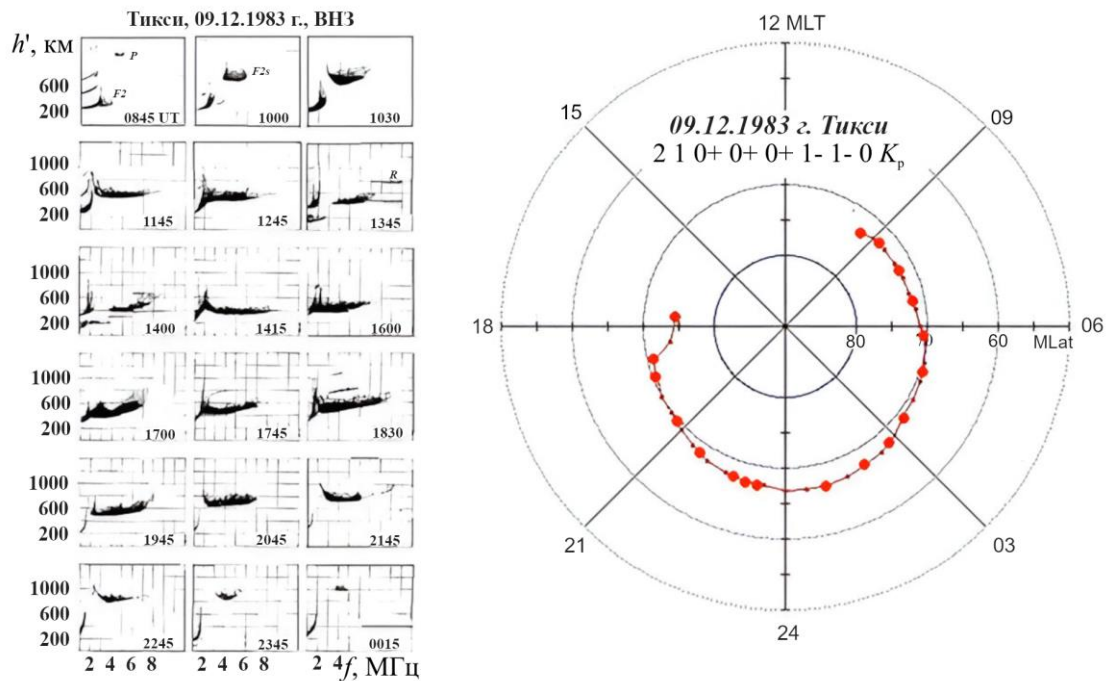


Рис. 2. Последовательность ионограмм возвратно-наклонного зондирования ионосферы ст. «Тикси» за 9 декабря 1983 г. (слева) и пространственно-временная динамика полярной стенки ГИП (справа) в этот же день

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 диффузные, 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 ~68°. Далее дополнительные отражения (плазменные неоднородности) медленно начинают смещаться к северу и достигают магнитной широты ~73° 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 волны 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  $\pm 50$  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, проводившиеся 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 ~69.1°. Такой же резкий край высыпаний виден и в утреннем секторе MLT (зеленая звездочка). Поскольку геофизическая ситуация носит стационарный характер, правомерно проводить сопос-



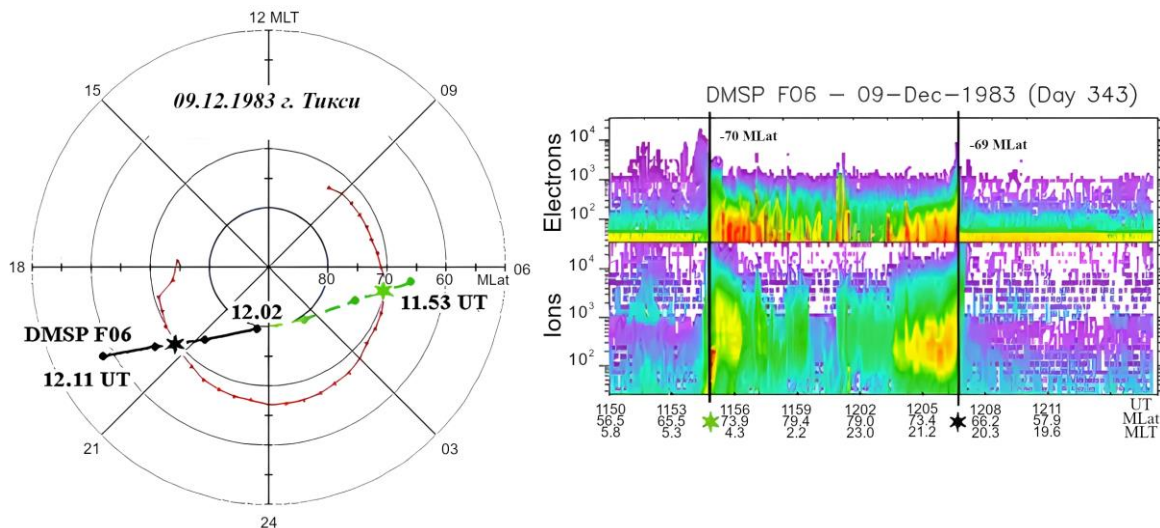


Рис. 3. Девятое декабря 1983 г.: траектория спутника DMSP-F06 в координатах MLat–MLT при пролете около 12 UT (слева) и спектрограммы электронных и ионных высыпаний (справа) за время пролета. Звездочки отмечают положение полярной кромки провала в вечернем (черная) и утреннем (зеленая) секторах

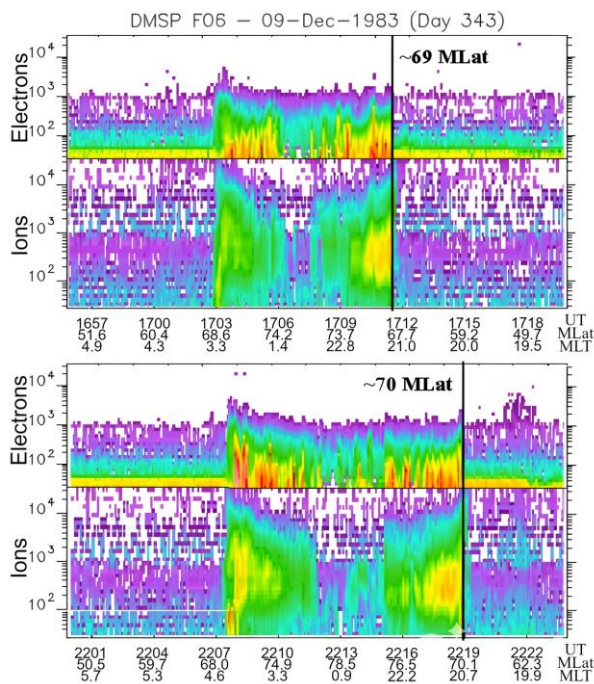


Рис. 4. Спектрограммы, записанные DMSP-F06 через ~5 (вверху) и 10 (внизу) часов соответственно после спектрограмм на рис. 3. Вертикальные черные прямые обозначают положение полярной стенки провала

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

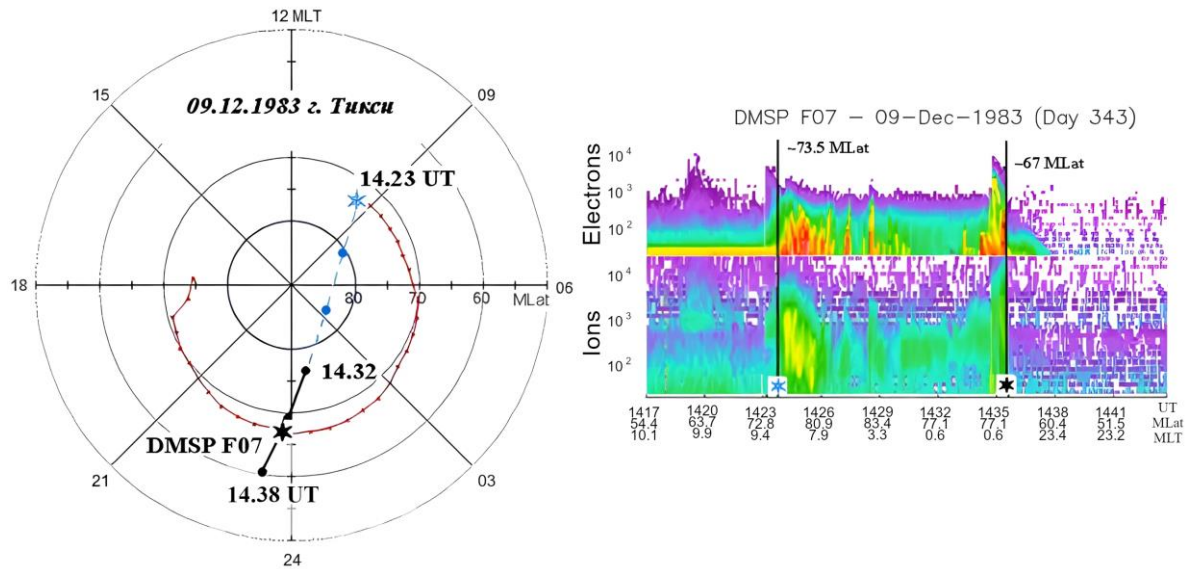


Рис. 5. Девятое декабря 1983 г.: траектория спутника DMSP-F07 в координатах MLat–MLT (справа) и спектрограммы электронных и ионных высыпаний (слева) за время пролета

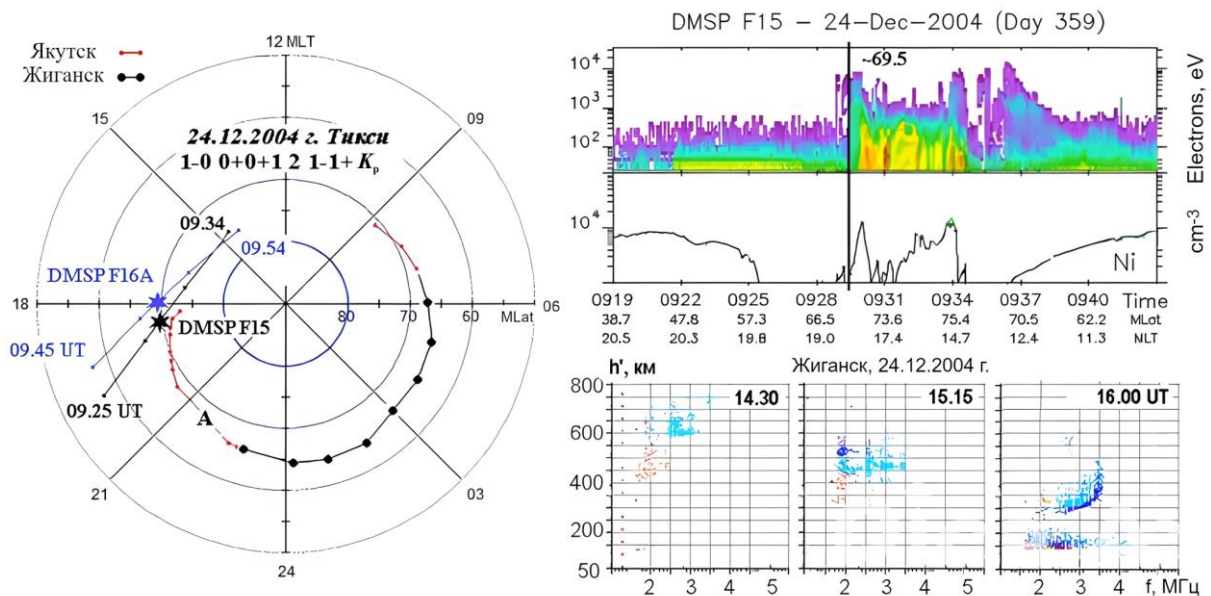


Рис. 6. Двадцать четвертое декабря 2004 г.: слева — траектории спутников DMSP-F15 и -F16A и положение полярной стенки ГИП по измерениям на станциях «Тикси» (красные точки) и «Жиганск» (черные точки) в координатах MLat–MLT; справа — спектрограмма электронных высыпаний и вариации плотности ионов (вверху), 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 A — экранировка вышележащего F-слоя нижележащим E-слоем [Руководство URSI..., 1977; Инструкция..., 1985]. На ионограммах ст. «Тикси» следы F<sub>2s</sub>-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 высыпавшихся электронов (см. рис. 3–6). Максимум спектрального распределения перекрывает интервал 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 высыпавшихся 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<sup>2</sup> 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  $\sim(2\div3)\cdot 10^4$  см<sup>-3</sup> ( $f=4\text{--}5$  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  $\sim(4\div8)\cdot 10^4$  см<sup>-3</sup> ( $f=6\text{--}8$  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 открытым 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 высыпавшихся 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 измерениям 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, присутствует 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 предоставление 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.: Гидрометеиздат, 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 аэронавтики*. 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 аэронавтики*. 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 аэронавтика*. 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., Malysheva 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).