

Препринт

**МОРФОЛОГИЯ И ДИНАМИКА
УЗКИХ ПРОВАЛОВ ИОНИЗАЦИИ
В СУБАВРОРАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ F**

ЯКУТСК 1987

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ОРДЕНА ЛЕНИНА СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ЯКУТСКИЙ ФИЛИАЛ
Институт космофизических исследований и астрономии

Препринт

МОРФОЛОГИЯ И ДИНАМИКА
УЗКИХ ПРОВАЛОВ ИОНИЗАЦИИ
В СУБАВРОРАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ F

*Доклад на 19 Генеральной Ассамблее МАГА
август 1987 г., г. Ванкувер, Канада*

Якутск
Якутский филиал СО АН СССР 1987

**МОРФОЛОГИЯ И ДИНАМИКА УЗКИХ
ПРОВАЛОВ ИОНИЗАЦИИ В СУБАВРО-
РАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ F.** Препринт / Ре-
шетников Д.Д., Филиппов В.М., Баи-
шев Д.Г. и др. — Якутск: изд. ЯФ СО АН
СССР, 1987. — 40 с.

В работе проанализированы одновременные спутниковые и наземные измерения параметров узкой полосы быстрых ионных дрейфов к западу и выявлены их ионосферные признаки по данным станций вертикального зондирования (ВЗ) и возвратно-наклонного зондирования (ВНЗ). Использовались измерения со спутников «Космос-184», АЕ-С, «Космос-900», ДЕ-1 и ДЕ-2. На основе ионосферного признака — «срыва» частоты в суточном ходе электронной концентрации исследована морфология и динамика узких провалов за один солнечный цикл. Представлены также результаты сопоставлений вероятности появления узких провалов с магнитной активностью.

Авторы:

Д.Д. Решетников, В.М. Филиппов,
Д.Г. Баишев, А.Е. Степанов, Р.П. Андреев,
А.И. Эверстов, Ю.И. Гальперин, В.Л. Халипов,
Л.Д. Сивцева, Л.В. Шестакова, В.В. Афонин,
В.Н. Алексеев, В.С. Соловьев

Ответственный редактор
В.М. Игватьев

© Якутский филиал
СО АН СССР, 1987

ВВЕДЕНИЕ

Узкие струи очень быстрых ионных дрейфов к западу вблизи проекции плазмопаузы на высотах области F впервые были зарегистрированы на спутнике «Космос-184» («Поляризационный джет», по терминологии авторов [1]). Позже такие полосы быстрых субавроральных ионных дрейфов были обнаружены по наблюдениям с других спутников [2—4], а также по измерениям наземных станций некогерентного рассеяния радиоволн [5—7] и радаров когерентного рассеяния радиоволн [8, 9]. Ввиду условий замагниченности плазмы на высотах области F такие струи быстрого западного ионного дрейфа отождествлялись с локальными интенсивными, направленными к полюсу электрическими полями, часто регистрируемыми на спутниках в том же пространственно-временном секторе [10, 11], что и быстрые субавроральные ионные дрейфы, которые достигают максимальных значений до долей вольта на метр.

Важность исследования такого уникального элемента в структуре конвекции плазмы на субавроральных широтах заключается, на наш взгляд, в его роли в формировании широтного профиля ионизации вблизи полярной стенки главного провала, в создании специфических аэрономических процессов (возбуждение оптических эмиссий, генерация неоднородностей различного масштаба, нагрев электронного и ионного газа), в связи его с другими геофизическими явлениями (с геомагнитными пульсациями, с радиосияниями и т.д.). В силу своей специфики спутниковые измерения не позволяют исследовать такие характеристики поляризационного джета, как динамика его временного развития, вариации местоположения, глубина и ширина, время жизни и долготная протяженность узких провалов ионизации и т.д.

Для упорядочения терминологии и лучшего понимания текста следует уточнить, что в данной работе под терминами «узкая полоса быстрого ионного дрейфа к западу», «поляризационный джет», «интенсивные локальные, направленные к полюсу электрические поля», «узкий провал ионизации», «субпровал» мы в дальнейшем будем по-

нимать одно и то же физическое явление, а именно: развитие сильных электрических полей вблизи проекции плазмопаузы и их «автограф» в структуре субавроральной ионосферы.

Целью данной работы является изучение морфологии и динамики узких провалов ионизации в области F по данным сети ионосферных станций на Северо-Востоке СССР для выяснения механизмов образования быстрых субавроральных ионных дрейфов.

В первой части препринта приводятся результаты анализа одновременных измерений со спутников быстрых ионных дрейфов, электрических полей и узких провалов в широтном распределении электронной концентрации с данными ВЗ и ВНЗ меридиональной цепочки станций с целью определения «автографа» быстрых ионных дрейфов на наземных ионограммах. Во второй части приведены морфологические характеристики узких провалов ионизации, найденные из анализа данных ионосферного зондирования за один солнечный цикл.

1. СОПОСТАВЛЕНИЕ ОДНОВРЕМЕННЫХ СПУТНИКОВЫХ И НАЗЕМНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В ОБЛАСТИ ПОЛОСЫ БЫСТРЫХ СУБАВРОРАЛЬНЫХ ИОННЫХ ДРЕЙФОВ

1.1. Определение «автографа» поляризационного джета на наземных ионограммах

Быстрые дрейфы ионов к западу, обусловленные интенсивными электрическими полями северного направления, обнаруженные по измерениям на спутниках [1—4, 10, 11], могут оказывать, по мнению авторов этих работ, значительное влияние на структуру и формирование субавроральной ионосферы. С целью выяснения ионосферных признаков «поляризационного джета» нами были исследованы характеристики ионосферы области F по данным наземных станций ВЗ и ВНЗ Якутской меридиональной цепочки, когда траектории пролетов спутников были близки к долготе станций наблюдения. На рис. 1 приведены результаты сопоставления одновременных измерений скорости дрейфа ионов в верхней ионосфере на спутнике «Космос-184» за 03.11.67 г. [1] и параметров ионосферы со станций ВЗ Тикси и Якутск для нахождения «тестовой» ситуации, т.е. установления конкретного вида ионограмм, характерных для развития «поляризационного джета» над станцией. На пролете 145 N спутник «Космос-184» прошел очень близко от станции Тикси и, следовательно, на следующем витке 146 N, когда на широтах $\Lambda_0 \sim 59,5^\circ \div 60,5^\circ$ наблюдался «поляризационный джет»,

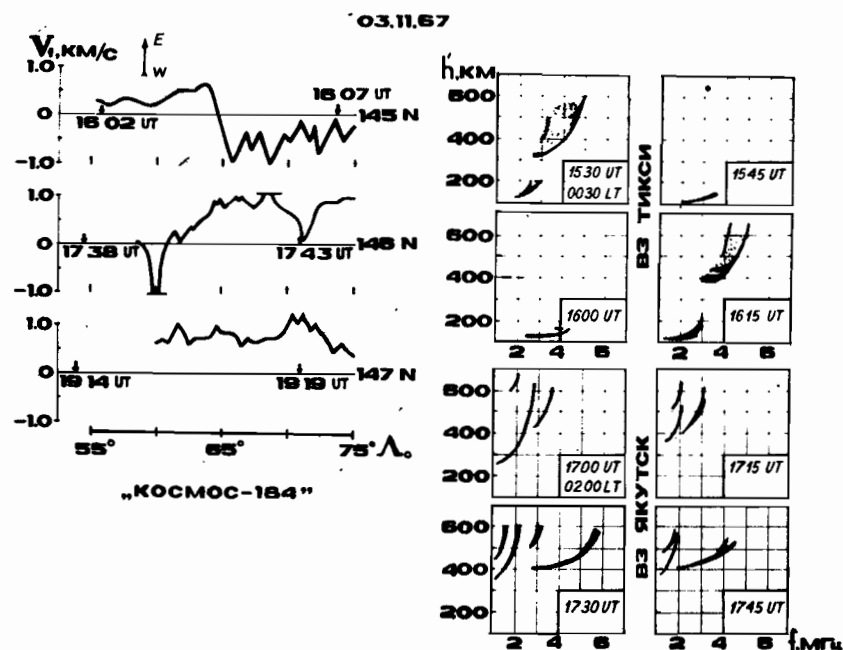


Рис. 1. Сопоставление одновременных измерений со спутника «Космос-184» [1] и наземных ионосферных данных за 03.11.67 г. Приведены спутниковые измерения скоростей ионных дрейфов на высоте 630 км на трех последовательных пролетах и ионограммы вертикального зондирования ионосферы со станций Тикси и Якутск

спутник проходил в пределах ~ 1 часа по MLT от меридиана наземных станций ВЗ. Последовательность ионограмм на рис. 1 по данным станции Тикси показывает ситуацию, соответствующую расположению станции ВЗ под полярной кромкой провала [12]. Ситуацию, характерную для случая появления «поляризационного джета» над станцией наблюдения можно увидеть из последовательности ионограмм станции ВЗ Якутск. Из рисунка видно, что в 1700 UT (0200 LT) на фоне спокойной ионосферы области дна главного ионосферного провала (ГИП) начинает регистрироваться дополнительный след с меньшей критической частотой на $h' \sim 600$ км. Такие следы отражений в работе [13] были определены как F_{3s}-отражения. В 1730 UT на ионограмме наблюдаются отражения от нескольких структур субавроральной ионосферы: F_{3s}-отражение, отождествляемое как ионосферный признак «поляризационного джета», наклонные F_{2s}-отражения, идентифицируемые в работе [12] как полярная стенка ГИП и отражения от фонового слоя ионизации.

В это же время возрастает диффузность следов на ионограмме, а критическая частота фонового слоя заметно уменьшается.

Еще более характерные данные для ситуации при развитии «поляризационного джета» над станцией наблюдения были получены при измерениях 14.03.74 г., когда спутник АЕ-С пролетел вблизи меридиана Якутской цепочки ионосферных станций и зарегистрировал узкую полосу быстрого дрейфа к западу, расположенную на широте $\Lambda_0 \sim 62,5^\circ$ [2]. Результаты этих одновременных измерений показаны на рис. 2. Из последова-

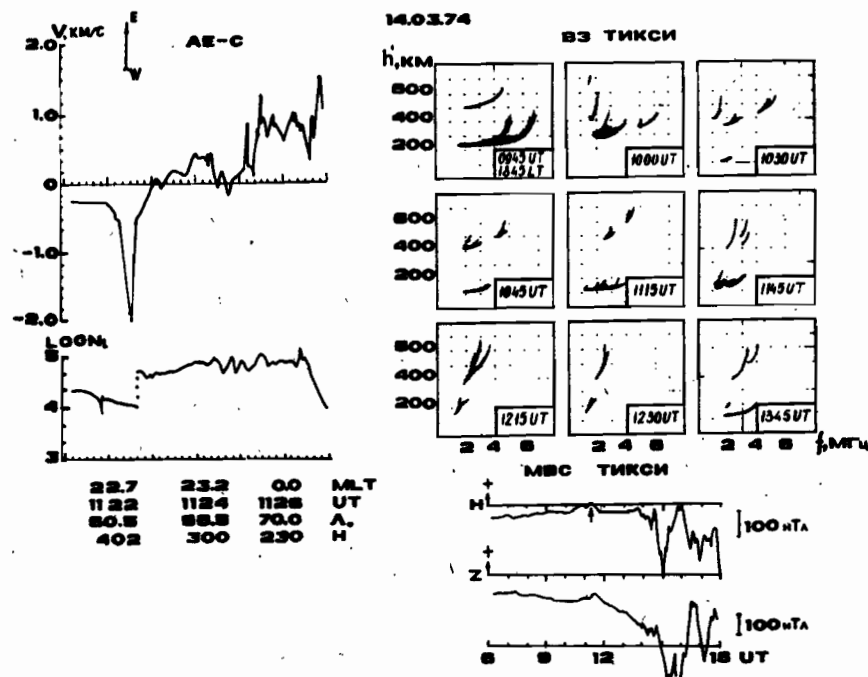


Рис. 2. Измерения скоростей дрейфа и концентрации ионов на высотах спутника АЕ-С [2] сравнены с ионограммами V3 станции Тикси за 14.03.74 г. Внизу показана магнитограмма МВС Тикси за этот день

тельности ионограмм V3 станции Тикси видно, что в 1000 UT (за $\sim 1,5$ часа до пролета спутника) регистрируется F₃-отражение, которое существует до 1045 UT включительно. Следы от фонового слоя F₂ в момент появления F₃, показывают сильную диффузность отражающей области и содержат черты для развития явлений «лакуна». Наиболее четко выражена «лакуна» на ионограмме в 1115 UT (хорошо видно отсутствие отраже-

ний от области F в диапазоне частот 3 ÷ 4 МГц, в то время как отражения на этих частотах от области E наблюдаются). Ионосферные данные также показывают резкое уменьшение критической частоты фонового слоя после регистрации F₃-отражения — ионосферного признака «поляризационного джета». Следует отметить, что измерение скорости быстрого западного дрейфа ионов на спутнике АЕ-С было проведено восточнее на $\sim 1,5$ ч по MLT.

Измерения со спутников [1—4, 10, 11] показали, что время существования быстрых дрейфов соизмеримо с длительностью суббури (1—3 ч), протяженность по местному времени — до нескольких часов, ширина ~ 100 —200 км, скорость дрейфа — до 2 ÷ 5 км/с.

В области полосы быстрого дрейфа на высотах максимума F концентрация электронов N_e понижена из-за выноса плазмы на дневную сторону, вследствие чего образуется узкий провал ионизации, который на ионограммах регистрируется в виде F₃-отражений. Это было подтверждено в работе [14], где показаны результаты регистрации узкого провала ионизации по синхронным измерениям со спутника «Ореол-3» и близко расположенных по широте (~ 100 км) станций V3 Архангельского меридиана.

1.2 Сопоставление динамики высотно-широтных профилей ионизации F-области с параметрами ионосферы, измеренными со спутников

Как было упомянуто ранее, спутниковые измерения носят эпизодический характер, т.е. они могут дать информацию, ограниченную и по времени, и по пространству. Применение данных наземных станций зондирования ионосферы позволяет проследить по характерным признакам динамику узкого провала ионизации.

Построение высотно-широтных профилей электронной концентрации на основе данных, полученных на Якутской меридиональной цепочке станций V3 и VНЗ, позволяет более наглядно представить те сложные изменения в структуре субавроральной ионосферы, которые возникают при развитии поляризационного джета, при приближении полярной кромки ГИП и т.д. Такие двумерные распределения N_e по результатам расчетов N(h)-профилей были ранее использованы в работе [14] по данным Архангельской цепочки станций, где они показали хорошее совпадение с непосредственными измерениями электронной плотности на борту спутника. При построении

высотно-широтных профилей плотности электронов нами учитываются направленные свойства антенн типа «горизонтальный ромб» при ВНЗ для различных частот зондирования, а также обращается особое внимание на правильную физическую интерпретацию сложных следов отражений на ионограммах субавроральных станций, что особенно важно при существовании спорадических образований в Е и F-областях. При экстраполяции изоконтуров ионизации на двухмерных картинах распределения электронной концентрации принимаются во внимание характерные масштабы таких структурных образований субавроральной ионосферы, как узкий провал ионизации и главный ионосферный провал. Как показывают спутниковые измерения [1, 10, 11], ширина узкого провала ионизации составляет $\sim 100 \div 200$ км, а размеры ГИП зависят от местного времени, сезона и уровня магнитной активности [15, 17, 18]. Методика определения местоположения полярной стенки ГИП по дополнительным следам наклонных спорадических отражений от области F (F_{2s} -отражения) с учетом рефракции радиоволн в существующей фоновой ионизации приведена в работе [12].

При построении изоконтуров электронной плотности с ионограмм снимаются следующие действующие высоты (в км): регулярного слоя F2, F_{2s} -отражений (полярная стенка ГИП), F_{3s} -отражений (узкого провала ионизации), регулярного и спорадического E-слоев при различных частотах зондирования с шагом $0,5 \div 2,0$ МГц, причем шаг по частоте определяется характером следов отражений. Наклонная дальность до полярной стенки провала затем пересчитывается по методике, приведенной в работе [12], на горизонтальное расстояние вдоль земной поверхности (в км) от станции наблюдения. Следует также отметить, что для более достоверного определения положения узкого провала нами использовались ионограммы ВНЗ на север и на юг. Например, отсутствие характерных следов F_{3s} при зондировании на север и наличие их на ионограммах при вертикальном и южном радиозондировании мы интерпретируем как локализацию этой структуры экваториальнее (на $1-2^\circ$) пункта наблюдения и, наоборот, полярнее при обратной картине событий.

Наконец, информация, полученная и проанализированная за определенный конкретный момент времени, представляется в виде мгновенного высотно-широтного распределения электронной концентрации.

Таким образом, построение высотно-широтных профилей ионизации по вышеописанной методике, хотя и обладает погрешностями из-за отсутствия количественной информации об

углах прихода отраженных радиоволн, однако позволяет проследить динамику крупномасштабных структур субавроральной ионосферы.

На рис. 3 приведена последовательность высотно-широтных профилей распределения ионизации в F-области для 07.10.81 г.,

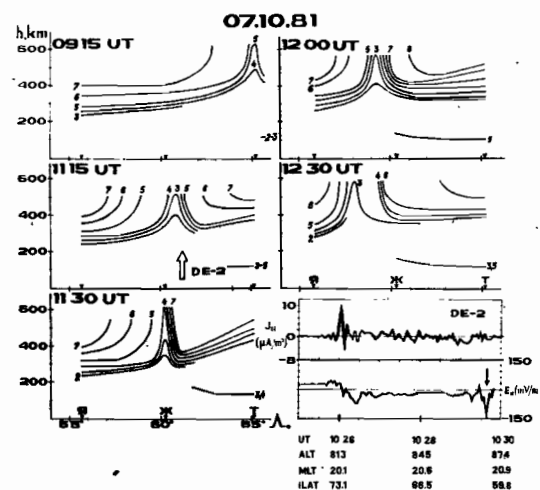


Рис. 3. Последовательность изоконтуров ионизации, построенная по данным Якутской меридиональной цепочки станций ВЗ и ВНЗ (Я — Якутск, Ж — Жиганск, Т — Тикси) и измерение E_x -компоненты электрического поля со спутника ДЕ-2 [15] за 07.10.81 г. Цифрами отмечены плазменные частоты в МГц. Стрелкой на высотном профиле в 1115 UT указано местоположение регистрации сильного электрического поля ($> |150|$ мВ/м) со спутника

построенных на основе вышеописанной методики, а на рис. 4 показаны характерные ионограммы ВЗ и ВНЗ цепочки ионосферных станций за этот день и магнитограмма станции Тикси. На рис. 3 в правом нижнем углу приведены измерения электрического поля E_x северного направления по данным спутника ДЕ-2 [16]. Спутник пролетал вблизи меридиана Якутской цепочки станций. Наблюдения проведены 07.10.81 г. На последовательности высотно-широтных разрезов, построенных по ионограммам ВЗ и ВНЗ, которые показаны на рис. 4, буквами на оси абсцисс отмечены местоположения станций: Я — Якутск, Ж — Жиганск, Т — Тикси, а по оси ординат отложены действующие высоты в километрах. Цифрами на кривых изоконтуров указаны плазменные частоты. Из рис. 3 видно, что узкий провал ионизации был зарегистрирован над станцией Тикси в 0915 UT задолго до пролета спутника. По данным магнитовариационной станции Тикси, момент регистрации F_{3s} -отражения приходится на фазу возрастания положительной бухты Н-компоненты (рис. 4). Скачок электрического поля ($> |150|$ мВ/м) по данным работы [16] показан широкой стрелкой в 1115 UT на картине изоконтуров ионизации. Спутниковые измерения проведены на 45 мин раньше момента

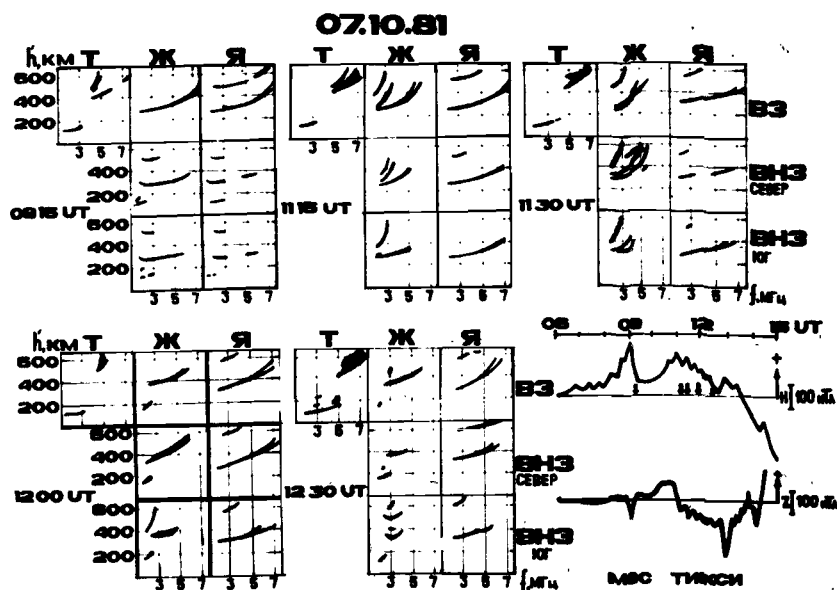


Рис. 4. Ионограммы ВЗ и ВНЗ Якутской меридиональной цепочки за 07.10.81 г. Стрелками на магнитограмме МВС Тикси отмечены моменты времени, за которые были взяты ионограммы

появления узкого провала над станцией Жиганск, но примерно на столько же смещены к востоку по MLT от меридиана наземных измерений. В интервале времени от 0915 UT до 1115 UT узкий провал ионизации сместился с широты станции Тикси ($\Lambda_0 \sim 65^\circ$) к широте станции Жиганск ($\Lambda_0 \sim 60^\circ$). Это смещение, по-видимому, связано с ростом интенсивности геомагнитных возмущений. В дальнейшем узкий провал перемещается также к экватору и в 1230 UT он располагается между Якутском и Жиганском (рис. 3 и 4).

В начале 1982 г. на Якутской меридиональной цепочке станций проводились координированные со спутником «Ореол-3» эксперименты по исследованию дрейфовых движений субавроральной ионосферы. Для измерения скоростей дрейфов мелкомасштабных неоднородностей применялся метод пространственно-разнесенного приема с малой базой (метод DI) [19]. Некоторые результаты координированных измерений быстрых дрейфов ионосферной плазмы методом DI были приведены в работе [20]. Ниже будут рассмотрены результаты таких координированных измерений за 25—26.02.82 г.

В это время по измерениям на спутнике «Ореол-3» были определены параметры вторгающихся частиц и широтное распределение N_e на высоте пролета спутника [21]. На основе наземных ионосферных измерений методами ВЗ и ВНЗ регистрировались положения полярной кромки ГИП и локализация узкого провала ионизации, а также скорости конвекции плазмы в области F методом DI со станции Якутск. Результаты наземных измерений показаны на рис. 5 и 6. На рис. 5,а в координатах местное магнитное время MLT — инвариантная широта Λ_0 представлены положения полярной кромки ГИП (определенные по данным станции Жиганск обозначены крестиками, а по данным станции ВНЗ Якутск — кружочками). Локализация узкого провала в N_e показана по данным станций Жиганск и Якутск (темные кружки на рис. 5,а). Стрелками показаны результаты измерений скоростей конвекции плазмы области F методом DI на станции Якутск. На этом же рисунке показана траектория пролета спутника «Ореол-3» на витке 2068 и результаты измерения положения экваториальной границы диффузных вторжений (ГДВ) малоэнергичных электронов (отмечено темной звездочкой), а также локализация узкого провала ионизации (светлая звездочка). В нижней части рисунка приведены вариации H-компоненты геомагнитного поля, по данным МВС ст. Жиганск. Отрезками прямых на рис. 5,а показаны погрешности измерений при локализации полярной стенки и узкого провала в N_e .

Результаты измерений вторгающихся частиц разных энергий по измерениям на «Ореол-3» (виток 2068) приведены на рис. 5,б, где широкой стрелкой отмечено положение ГДВ, определенное по методике, описанной в работе [22]. В нижней части рисунка изображено распределение электронной концентрации по данным этого же спутника, показывающее существование узкого провала ионизации. На высоте пролета спутника на широте $\Lambda_0 \approx 57,2^\circ$ электронная концентрация в минимуме узкого провала составляет $\sim 10^3$ эл/см³.

На рис. 6 показаны высотно-широтные профили электронной концентрации за рассматриваемое на рис. 5 время — 25—26.02.82 г. Из рисунка видно, что узкий провал ионизации и полярная стенка ГИП начали наблюдаться одновременно в 0945 UT (1845 LT) станцией ВЗ и ВНЗ Жиганск. В дальнейшем происходило смещение этих структур к экватору и в 1330 UT (рис. 5,а) узкий провал располагался над станцией Якутск, а полярная стенка — на широте $\Lambda_0 \approx 59,7^\circ$. Из последовательности изоконтуров ионизации хорошо видно, что происходит постепенное изменение электронной плотности в области узкого провала и ГИП, а также отсутствие спорадических образований в области E над узким провалом ионизации.

25-26.02.82

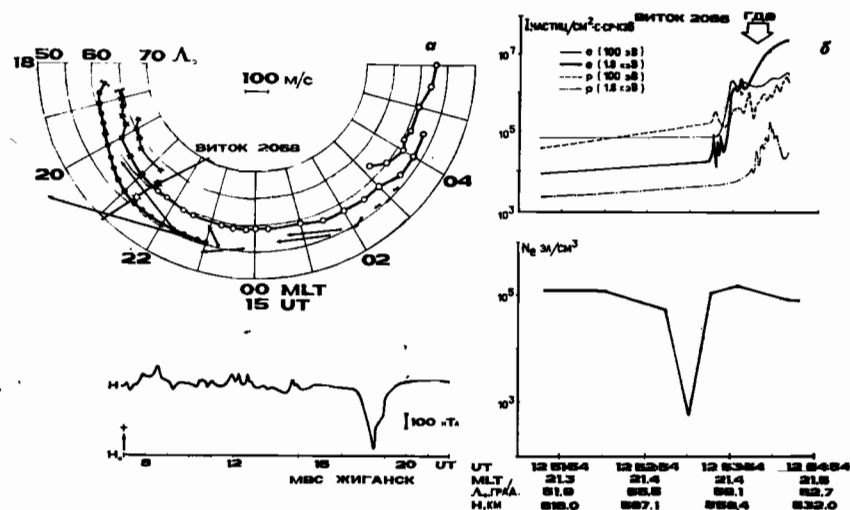


Рис. 5. а — В координатах инвариантной широты — местное время показана динамика полярной стенки ГИП (крестики — по данным ст. Жиганск, светлые кружки — по данным ст. Якутск) и узкого провала ионизации (темные кружки) за 25—26.02.82 г. На витке 2068 спутника «Ореол-3» темной и светлой звездочками соответственно показаны положения ГДВ и узкого провала. Стрелки означают направление и величину скоростей конвекции плазмы, полученных методом DI. Масштаб скорости приведен в центре рисунка. Внизу показаны вариации H-компоненты геомагнитного поля по данным МВС Жиганск.

б — Результаты измерений интенсивностей вторгающихся частиц (сверху) и широтного распределения электронной плотности (внизу) на спутнике «Ореол-3»

Из рис. 5 видно, что в пределах ошибок эксперимента ($\sim 1^\circ$) положения ГДВ и полярной кромки ГИП, а также местоположение узкого провала ионизации, определенные по одновременным наземным и спутниковым данным, совпадают. Измерения скорости дрейфа конвекции плазмы области F-методом DI после 1300 UT показывают резкое возрастание модуля скорости в западном направлении (вплоть до ~ 800 м/с), т.е. такое резкое увеличение скорости дрейфа ионизации наблюдается в момент регистрации узкого провала ионизации в зените станции Якутск. Скорости дрейфа к западу принимают свои характерные величины для области провала ГИП ($100 \div 200$ м/с [23]) после 1400 UT, когда исчезают F₃-отражения, характерные для локализации узкого провала вблизи зенита станции наблюдения.

Результаты, представленные в работах [20, 23], а также на

25.02.82

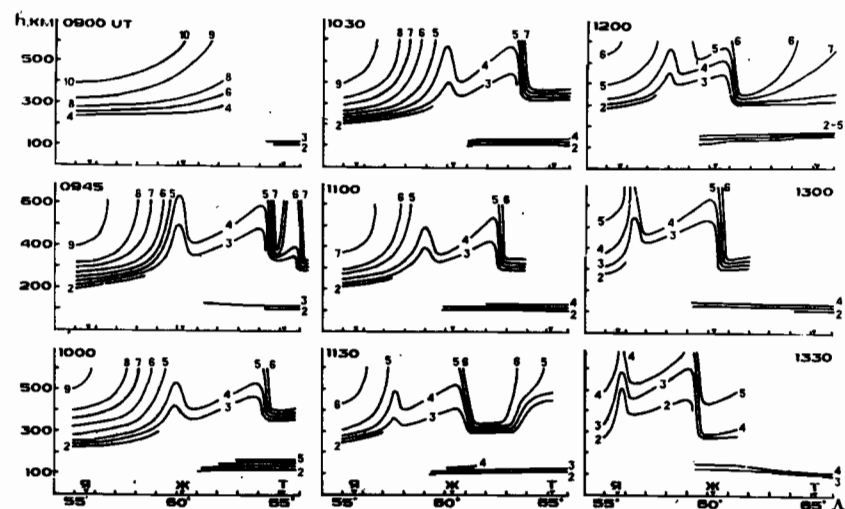


Рис. 6. Последовательность высотно-широтных профилей ионизации, полученная по ионограммам наземных станций за 25.02.82 г.

рис. 5 и 6, показали, что метод DI позволяет проследить за временной динамикой вариации скорости быстрых субавроральных ионных дрейфов, которая, по нашим наблюдениям, зависит от формы и фазы развития узкого провала ионизации. Как оказалось, поведение модуля скорости быстрого дрейфа ионов не остается постоянным в течение развития явления полярного джета. Измерения показали, что уменьшение скорости дрейфа к западу до обычно наблюдаемых значений в области дна главного провала ($100\text{—}200$ м/с) происходит в период перехода узкого провала в главный провал ионизации (рис. 5 и 6). Длительность существования явления быстрых субавроральных ионных дрейфов по нашим измерениям составляет 2—3 ч [20, 23], что совпадает с результатами наблюдений на двух разнесенных радарах когерентного рассеяния радиоволн [9].

По результатам измерений, приведенных на рис. 5 и 6, также можно сделать вывод о том, что в области узкого провала ионизации высвобождаются мягкоэнергичные частицы не наблюдается, и ГДВ, формирующая полярную стенку ГИП, регистрируется существенно полюжнее узкого провала. Рассмотрим сопоставления наземных измерений с измерениями еще одного спутника «Космос-900» [24]. По наземным данным анализируются те моменты времени, когда спутник регистрирует уз-

кие (50 ÷ 200 км) провалы в электронной концентрации с резкими пиками в значениях T_e . Если считать, что регистрируемые на ИСЗ «Космос-900» узкие провалы в N_e обусловлены развитием быстрых ионных дрейфов к западу, т.е. появлением интенсивных, направленных к полюсу электрических полей вблизи проекции плазмопаузы, то данные наземных ионосферных станций должны показывать возникновение дополнительных следов отражений от области F, свидетельствующих об образовании вблизи зенита станции наблюдения узких провалов ионизации.

На рис. 7,а приведены результаты измерений N_e и T_e на двух соседних витках спутника «Космос-900» за 2 апреля 1979 г. Значения N_e обозначены темными кружками, а T_e — светлыми. В нижней части рисунка даны моменты измерений в мировом и местном времени и координаты спутника в географической системе координат.

Как видно из рис. 7,а, на витке 11236 спутник регистрирует глубокий узкий (~100 км) провал ионизации вблизи полярной стенки провала, сопровождаемый резким подъемом T_e с ~2300° до ~4000°. Этот пролет пересек широту станции Якутск на 4° западнее по меридиану. На рис. 7,б приведены данные ионосферной станции за 5 сроков наблюдений в виде ионограмм ВЗ и ВНЗ. Из рис. 7,б видно, что дополнительная отражающая структура (F_{3s}-отражения по терминологии [13]), свидетельствующая о наличии узкого провала ионизации, появляется в 1830 UT, т.е. вблизи момента пролета спутника, хотя в предыдущий срок в 1815 UT этот след не регистрировался. F_{3s}-отражения наблюдаются до 1915 UT. В 1930 UT наблюдается только фоновая ионизация. Следовательно, основываясь на результатах вышеприведенных сопоставлений с других спутников, можно предполагать, что узкие провалы ионизации, регистрируемые спутником «Космос-900», также обусловлены развитием «поляризационного джета». На следующем витке 11237 (рис. 7,а) спутник сдвигается на более западную долготу λ ~ 100° и снова регистрирует наличие узкого провала на той же широте, при этом узкий провал уже стал не таким глубоким и скачок электронной концентрации по амплитуде не так высок, как это было зарегистрировано на предыдущем витке. Таким образом, узкий провал ионизации является долгоживущей структурой во времени и пространственно совпадает с резким увеличением электронной температуры T_e . Величина скачка электронной температуры зависит от разности между значением электронной плотности в узком провале и фоновой ионизацией и составляет обычно 500—2000 К. В работе [6] по одновременным ракетным запускам и измерениям на установ-

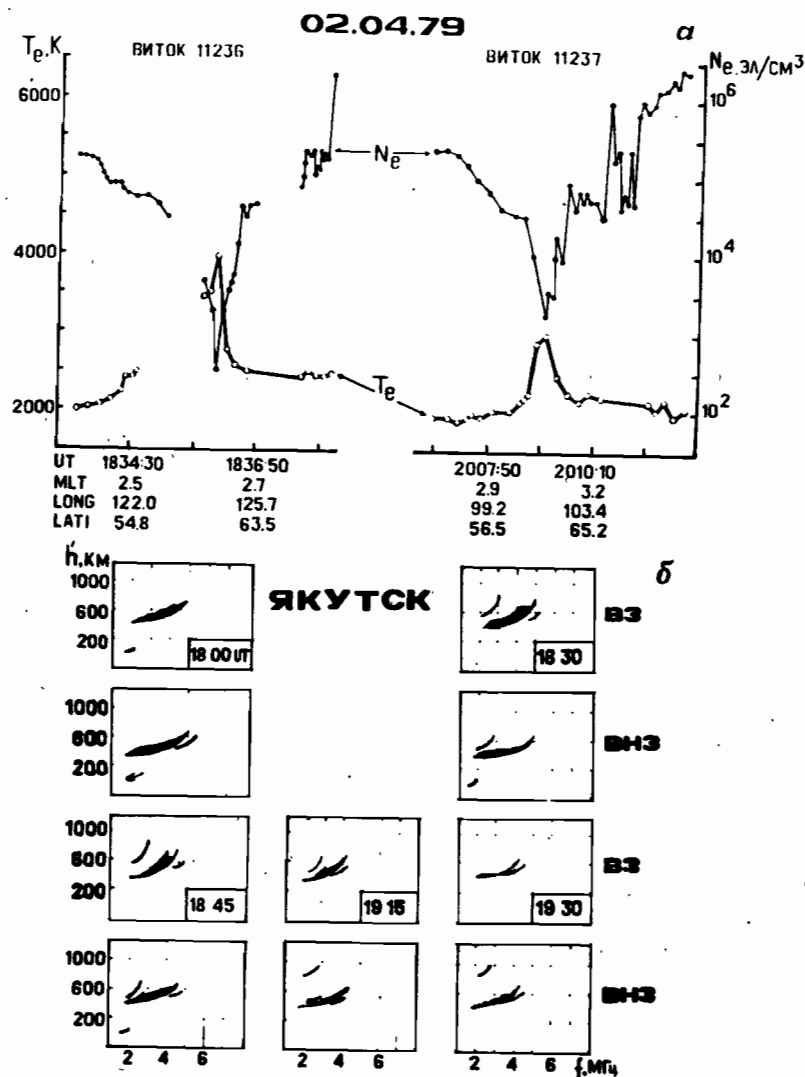


Рис. 7. Сопоставление измерений концентрации и температуры электронов на двух последовательных витках спутника «Космос-900» [24] с ионограммами ВЗ и ВНЗ станции Якутск

ке некогерентного рассеяния радиоволн в Чатанике было показано, что в сильных электрических полях (>60 мВ/м) увеличивается высотный уровень перехода от молекулярных составляющих к ионным (на ~50 км) и резко возрастает ско-

рость реакции $N_2 + O^+ \rightarrow NO^+ + N$. Рост концентрации NO^+ способствует быстрому исчезновению N_e из-за диссоциативной рекомбинации. В работе [10] по измерениям на радаре некогерентного рассеяния скоростью дрейфа ионизации было также показано, что области быстрых западных ионных дрейфов увеличения T_e , T_i и сильного понижения N_e пространственно совпадают, и для объяснения образования узких провалов в послеполуденном секторе авторы работы [25] привлекают вышеописанный механизм. По наблюдениям на Европейском радаре некогерентного рассеяния также было обнаружено пространственное совпадение областей понижения электронной концентрации N_e и увеличения T_e [26]. Этот факт автор [26] объясняет тем, что при постоянстве поступающей энергии на высоты области F (в условиях отсутствия выпадения частиц) рост T_e влечет за собой уменьшение N_e . В работе [27] по данным этого же радара делается вывод, что увеличение T_e без роста N_e может быть вызвано интенсивными электростатическими волнами, генерируемыми при нелинейном взаимодействии быстрых авроральных электронов с плазмой области F.

Таким образом, можно считать, что пространственно-временное совпадение узких провалов с резкими пиками в значениях T_e объясняется достаточно сложными физическими явлениями в верхней ионосфере, и для их понимания необходимы дальнейшие исследования.

Далее приступим к рассмотрению одновременных измерений параметров субавроральной ионосферы по данным Якутской меридиональной цепочки станций ВЗ и ВНЗ и опубликованных недавно спутниковых данных из работы [28] в моменты времени, когда траектории спутников пролегли вблизи меридиана цепочки. В этой работе приведены результаты измерений концентрации и температуры электронов на высотах выше максимума области F ($400 \div 900$ км) со спутника ДЕ-2, а также измерения концентрации легких ионов H^+ , He^+ и иона O^+ и температуры H^+ на расстояниях $2 \div 3 R_E$ с высокоапогейного спутника ДЕ-1. Из работы [28] по данным спутника ДЕ-2 нами определялись положения полярной стенки главного провала и узкого провала ионизации, а положение плазмопаузы — по резкому градиенту легких ионов, измеренных высокоапогейным спутником ДЕ-1. При идентификации узких провалов в N_e использовался также известный факт, что в этой области наблюдается резкий и узкий максимум в широтном распределении электронной температуры.

12 ноября 1981 г. На рис. 8,а, в координатах инвариантная широта Λ_0 — местное магнитное время (MLT) приведена пространственно-временная динамика полярной стенки ГИП и по-

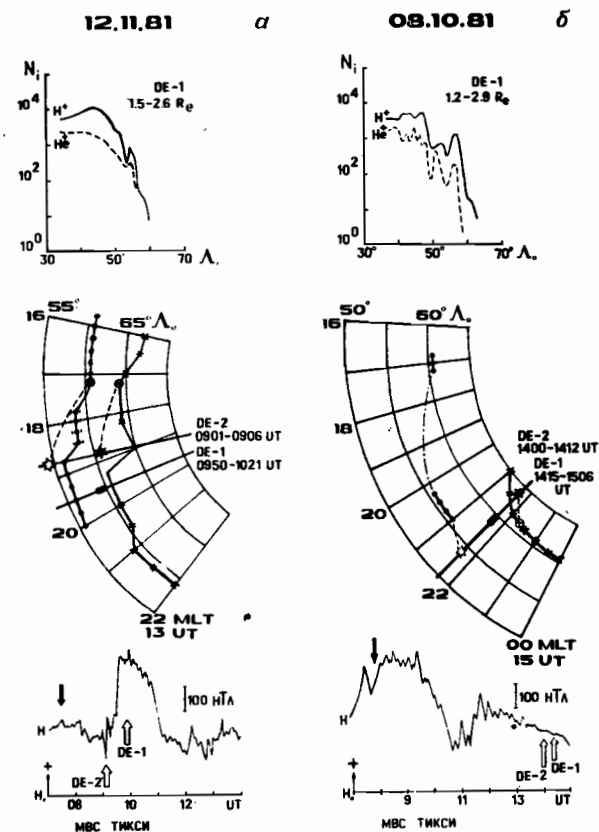


Рис. 8. Пространственно-временная динамика полярной стенки ГИП (крестики) и узкого провала (кружки) по наземным данным и траектории пролетов спутников ДЕ-1 и ДЕ-2 за 12.11.81 г. (а) и 08.10.81 г. (б). Темной и светлой звездочками на траектории ДЕ-1 и черным прямоугольником на траектории ДЕ-2 соответственно показаны положения полярной стенки ГИП, узкого провала и проекции плазмопаузы. Моменты одновременных измерений соединены штриховой линией. В верхней части рисунка показаны результаты измерений на ДЕ-1, по которым определялось положение плазмопаузы. В нижней части приведены вариации H^+ -компоненты геомагнитного поля за эти дни, где стрелками указано время пролетов спутников

ляризационного джета по данным Якутской меридиональной цепочки ионозондов. Здесь крестиками отмечены положения полярной стенки провала, а темными кружками — положения поляризационного джета, идентифицируемые с узким провалом ионизации. Как видно из рисунка, поляризационный джет начал наблюдаться над станцией Жиганск в 0645 UT.

Через 15 мин на широте $\Lambda_0 \approx 67,3^\circ$ регистрируется полярная стенка главного ионосферного провала. До момента пролета спутника ДЕ-2, траектория которого проходит примерно на 1 ч к востоку от Якутского меридиана (0901—0906 UT, 18.6—19.2 MLT), поляризационный джет находился в зените ст. Жиганск, а полярная стенка сместилась к экватору до широты $\Lambda_0 \approx 64,1^\circ$. Станция Якутск ($\Lambda_0 = 56^\circ$) находилась под невозмущенной ионосферой, а ст. Тикси в момент пролета спутника регистрировала спорадический E-слой типа g. На траектории спутника светлой и темной звездочкой соответственно отмечены положения узкого провала ионизации и полярной стенки провала. Синхронные спутниковые и наземные измерения, обведенные кружочком, соединены штриховой линией. Положение плазмопаузы на более близком пролете спутника ДЕ-1 (0950—1021 UT, 19.4—19.8 MLT) показано черточкой вдоль траектории. Видно, что дальнейший ход наблюдаемых с землей структур приблизительно подтверждает мгновенную картину событий, полученных при одновременном измерении — поляризационный джет накрывает зенит ст. Якутск или, точнее, ст. Якутск «подплывает» под эту структуру, а стенка провала остается почти на одной широте. С 0845 до 0915 UT положение поляризационного джета установить точно не удается, хотя и видны характерные следы от него на ионограммах, но только при зондировании на юг. Поэтому на рис. 8,а в этот период времени нанесены его примерные положения. После 1100 UT узкий провал ионизации не наблюдается. Со времени регистрации полярной стенки и до ее исчезновения около 1400 UT предельные частоты отражений от нее на ионограммах уменьшились от 6 до 3 МГц.

В нижней части рисунка приведены вариации N-компоненты геомагнитного поля Земли по измерениям на ст. Тикси. Стрелками отмечены моменты пролетов ДЕ-1 и ДЕ-2.

8 октября 1981 г. Траектории обоих спутников в этот день (рис. 8,б) проходили чуть к западу от меридиана Якутской цепочки и, что особенно важно, спутники пролетали одновременно по мировому и по местному магнитному времени (ДЕ-1: 1415—1506 UT, 21.6—21.8 MLT; ДЕ-2: 1400—1412 UT, 21.6—21.8 MLT). Момент одновременных измерений полярной стенки провала соединен штриховой линией. Поляризационный джет наблюдался с 0745 до 0815 UT над ст. Жиганск и с 1115 до 1200 UT на ст. Якутск, а штрих-пунктирная линия, соединяющая эти периоды наблюдений, означает здесь приблизительное смещение джета от широты Жиганска к широте Якутска. Спутник ДЕ-2 регистрирует узкий провал на широте $\Lambda_0 = 54^\circ$, что примерно на 2° южнее ст. Якутск. Отсутствие характер-

ных следов (F_3 -отражений) на ионограммах ст. Якутск можно объяснить дальнейшим смещением этой узкой полосы дрейфа к югу от станции, что подтверждается спутниковым измерением узкого провала на $\Lambda_0 = 54^\circ$. В момент пролета спутника над ст. Тикси наблюдались E_{sr} и F-слои с повышенными значениями критических частот.

В нижней части рисунка 8,б также приведены вариации N-компоненты геомагнитного поля по магнитометрическим данным ст. Тикси. Стрелками обозначено время пролетов спутника ДЕ-1 и ДЕ-2.

Как видно из рисунков 8,а, б, узкий провал в N_e по наземным данным в обоих случаях регистрируется до начала положительной бухты в N-компоненте в вечернем секторе.

Сопоставления мгновенных положений полярной стенки ГИП и узкого провала в широтном ходе N_e по наземным данным, приведенные на рис. 8, показывают хорошее пространственное совпадение с результатами спутниковых измерений. При этом заметим, что одним из преимуществ наземных наблюдений является то, что контроль за положением таких структур, как полярная стенка провала и узкий провал ионизации, может вестись почти в непрерывном режиме, тогда как спутниковые измерения носят эпизодический характер. Как видно из рис. 5, 8, данные меридиональной цепочки ионосферных станций показывают, что положение узкой полосы быстрого дрейфа на запад локализовано всегда внутри главного провала, экваториальнее полярной стенки ГИП, а разница по широте между «провалом в провале» и стенкой главного провала, по видимому, зависит от интенсивности и местного времени возникновения суббури и варьирует в пределах от 2 до 8° инвариантной широты. Иными словами, в начальный момент развития суббури разница между положением узкого провала и полярной стенки ГИП большая, чем в конце или в фазе восстановления суббури. По конфигурации пространственно-временной динамики этих структур в вечерние часы (рис. 5, 8) видно, что с развитием суббури обе структуры движутся в сторону экватора, причем меридиональная скорость смещения у полярной стенки провала больше, чем у поляризационного джета.

В неосвещенной ночной субавроральной ионосфере картина распределения ионизации определяется главным образом корпускулярным источником ионизации — электронами небольших энергий, образующих диффузную авроральную зону, и, в первую очередь, текущим положением экваториальной границы диффузной авроральной зоны — ГДВ. Совпадение полярной стенки провала и ГДВ было подтверждено во многочисленных экспериментах [12, 23, 29]. Результаты рассмат-

риваемых в этой работе сопоставлений (рис. 5, 8) показывают, что главный ионосферный провал располагается внутри плазмосферы, причем положение полярной стенки провала и проекция плазмопаузы с учетом ошибок эксперимента (ошибка определения полярной стенки провала по наземным данным составляет $\pm 0,5^\circ$ [12]) достаточно близки друг к другу.

2. МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УЗКИХ ПРОВАЛОВ ИОНИЗАЦИИ ПО НАЗЕМНЫМ ДАННЫМ

2.1. Динамика изменения ионограмм на сети станций ВЗ при «наплывании» на них узкого провала ионизации

Экспериментальные исследования узких провалов ионизации наземными методами сопряжены с определенными трудностями, такими как редкость сети ионосферных станций, сложность интерпретации полученных данных и отсутствие методики обработки. Одним из важных моментов в исследовании морфологии узких провалов ионизации является разработка и выбор методики обработки ионосферных данных и их представления.

Анализ ионограмм, полученных в моменты развития быстрых субавроральных ионных дрейфов вблизи зенита станции наблюдения, показал, что в эти периоды происходит резкое уменьшение критической частоты f_0F_2 за короткий интервал времени $15 \div 30$ мин на $2 \div 4$ МГц и более. Для точной и достоверной идентификации следов отражений при формировании узких провалов ионизации нами были проанализированы данные сети станций ВЗ, работавших во время комплексной геофизической экспедиции 1968—1969 гг. [30]. В этот период были проведены измерения с наибольшим числом станций ВЗ на территории Северо-Востока СССР, причем на тех инвариантных широтах, на которых локализуется полоса быстрого субаврорального ионного дрейфа по спутниковым измерениям [2]. Кроме данных, полученных в период комплексной высокоширотной экспедиции, для анализа были использованы ионосферные данные за 1968—1983 гг. на сети высокоширотных станций СССР, координаты которых приведены в таблице.

В качестве примера рассмотрим динамику следов отражений при формировании узкого провала ионизации на основе анализа данных, полученных на сети станций ВЗ за 15 марта 1969 г.

За период наблюдений геомагнитная активность была умеренно возмущенной с $\Sigma K_p = 26_0$. На рис. 9 приведены после-

Станция	Геогр. координаты		Инвариантная широта Λ_0 , град.	Параметр L
	φ , град.	λ , град.		
М. Шмидта (МШ)	68,90	179,5	63,8	5,14
Омолон (О)	65,2	160,5	59,0	3,67
Зырянка (З)	65,6	148,6	59,4	3,7
Батагай (Б)	67,7	134,6	61,1	4,3
Тикси (Т)	71,6	129,0	65,0	5,61
Якутск (Я)	62,0	129,8	56,0	3,05
Жиганск (Ж)	66,8	123,4	60,4	4,06
Норильск (Н)	69,4	88,1	63,61	5,06
Салехард (С)	66,5	66,7	61,18	4,3
Архангельск (А)	64,6	40,5	60,1	4,02
Мурманск (М)	69,0	33,0	65,75	5,51

довательности ионограмм за 15.03.69 г. станций Омолон, Тикси, Батагай, Якутск и Норильск. На ионограммах станции Омолон в 1000 UT появились следы, указывающие на появление узкого провала ионизации над станцией. След отражений от фонового F2-слоя содержит черты, характерные для развития «лакуны» (ослабление отраженного сигнала или полное отсутствие отражений в определенном диапазоне частот из-за сильной турбулизации плазмы в области F и поглощения энергии падающей волны [31]); в данном случае в диапазоне частот $3 \div 4$ МГц отсутствует отраженный сигнал, который является дополнительным свидетельством об усилении горизонтальных электрических полей и развитии плазменных неустойчивостей [31, 32]. Следы отражений от F2-слоя и E_s-слоя на ионограмме в 1045 UT свидетельствуют о нахождении станции Омолон вблизи диффузной авроральной зоны.

Из последовательности ионограмм станции Тикси видно, что в 0800 UT отраженный след становится диффузным и является расслоение следа в области частот $5 \div 6$ МГц. В 0815 UT появляются F₃-отражения с критической частотой 5,0 МГц, т.е. характерный след от узкого провала ионизации.

На ионограммах станции Батагай в 0930 UT над основным следом появляется диффузный след с предельной частотой, меньшей чем f_0F_2 , а в 0945 UT зарегистрированы F₃-отражения, указывающие на развитие быстрого субаврорального ионного дрейфа в зените станции наблюдения. В последующие сроки зондирования, от 0945 до 1045 UT, вспышки поглощения сменялись сложными следами отражений, трудно поддающимися интерпретации и показывающими очень изменчивую структуру отражающей области.

На ионограммах, полученных на станции Якутск, резкое уменьшение частоты f_0F_2 не наблюдается, но в 1145 UT на ионограмме появляются F₃-отражения. Следы F₃-отражений наблю-

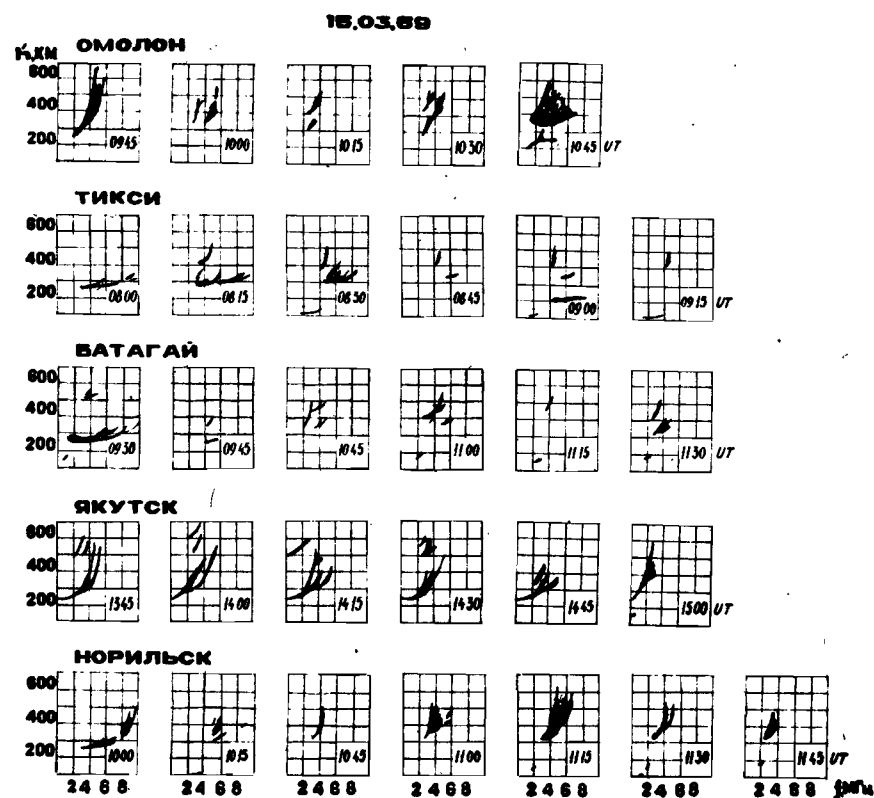


Рис. 9. Последовательность ионограмм станций Омолон, Тикси, Батагай, Якутск и Норильск за 15.03.69 г.

даются до 1300 UT, а критическая частота фонового слоя падает до уровня частоты $F3_s$ -отражения. Следовательно, узкий провал ионизации трансформируется в главный ионосферный провал.

На рис. 9 представлена последовательность ионограмм станции Норильск, находящейся западнее (на $\sim 41^\circ$) Якутского меридиана. Из последовательности ионограмм видно, что в 1000 UT возникают характерные признаки появления узкого провала ионизации: диффузность и расслоение следа, развитие «лакуны». В 1015 UT регистрируется след с критической частотой $\sim 6,0$ МГц, а след с более высокой критической частотой исчезает. В 1045 UT критическая частота следа становится равной 4,3 МГц, что свидетельствует об отражении радиоволн от области узкого провала ионизации. За начало резкого умень-

шения частоты можно считать момент времени 1015 UT, когда частота за 15–30 мин уменьшилась с 9,0 МГц до 4,3 МГц. С 1215 UT станция находится в диффузной авроральной зоне, на это указывают следы E_{sr} и $F2_s$ -отражений [12].

Таким образом, формирование узкого провала ионизации, обусловленного быстрым субавроральным ионным дрейфом, на ионограммах высокоширотных станций проявляется в закономерной динамике изменений следов отражений, показывающих быстроменяющуюся структуру отражающей области, и такое изменение следов отражений происходит не только на одной станции, но одновременно на нескольких высокоширотных станциях, расположенных на разных долготах. Это показывает, что данное геофизическое явление имеет крупномасштабный характер.

2.2. Идентификация узких провалов по f-граммам

Совместный анализ ионограмм и суточных f-графиков при формировании узких провалов ионизации показал, что резкие уменьшения частоты f_0F2 на суточном f-графике выглядят как «срыв» частоты в регулярном суточном ходе. О таких же «срывах» в суточном ходе критических частот слоя F2 ионосферы сообщается в работах [17, 33–35], где авторы связывают их с влиянием сильных электрических полей на структуру ионосферы.

Рассмотрим суточные f-графики станций Тикси, Батагай и Якутск за 15 марта 1969 г., которые приведены на рис. 10. Ионограммы этих станций за этот день были проанализированы в разделе 2.1 (рис. 9). Из суточного f-графика ст. Тикси видно, что «срыв» f_0F2 произошел между 1645 LT (0800 UT) и 1700 LT, критическая частота уменьшилась с 9,1 МГц до 4,5 МГц. На суточном f-графике ст. Батагай последняя наибольшая частота f_0F2 зафиксирована в 1830 LT (0930 UT). В 1845 LT на f-графике не определены параметры следов отражений, хотя в этот момент времени на ионограмме появились следы, характерные для формирования узкого провала ионизации. По f-графику ст. Батагай можно уверенно определить «срыв» частоты в суточном ходе, а также начало «срыва» (1845 LT). За 1 ч. 30 мин уменьшение частоты f_0F2 произошло с 10,1 МГц до 4,5 МГц. На суточном f-графике ст. Якутск «срыв» частоты f_0F2 не зарегистрирован и не отмечены следы $F3_s$ -отражений, хотя они были видны на ионограммах.

Таким образом, информацию об узком провале ионизации при умеренно-возмущенных условиях на широтах ст. Якутск можно получить, изучая оригинальные ионограммы, так как

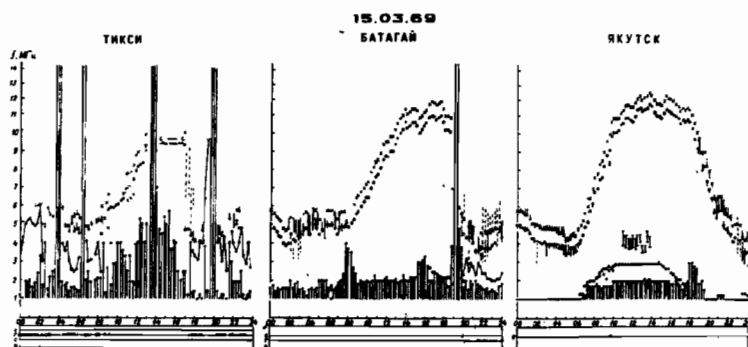


Рис. 10. f-графики станций Тикси, Батагай и Якутск за 15.03.69 г.

иногда по суточным f-граммам нельзя получать информацию о «срыве» частоты, который указывает на существование сильных электрических полей.

При достаточно высоком уровне геомагнитной активности на f-граммах станций этих широт уверенно определяются «срывы» f_0F_2 , а на f-граммах авроральных станций возникают трудности определения «срывов» f_0F_2 из-за частых вспышек поглощений и экранировки области F нижележащей ионизацией (условие А).

Таким образом, анализ ионограмм и суточных f-графиков за большой период времени в условиях формирования узких провалов ионизации при различных уровнях геомагнитной активности привел к следующим выводам:

— в условиях формирования узкого провала на f-граммах ионосферных станций наблюдается резкое уменьшение («срыв») частоты f_0F_2 (на $2 \div 4$ МГц и более) за короткий интервал времени ($15 \div 30$ мин);

— «срыв» критической частоты f_0F_2 сопровождается, кроме F_3 -отражений, следующими дополнительными признаками: а) появление диффузности и расслоений следов отражений; б) явление «лакуны» и в) наличие характерных отражений от области E (E_{ss} — косой E_s). Причем эти признаки могут наблюдаться вместе или каждый в отдельности в зависимости от широты станции наблюдения и уровня геомагнитной активности. После начала «срыва», через $15 \div 30$ мин, появляются отражения E_s типа г, а также наклонные отражения на ионограммах ВЧЗ от полярной стенки ГИП.

2.3. Суточные и сезонные распределения частоты появления узких провалов ионизации

Для анализа временных характеристик узких провалов ионизации выбраны данные (суточные f-графики), полученные на Якутской меридиональной цепочке станций: Тикси, Батагай, Якутск за 1968—1969 гг. — период максимума солнечной активности и за 1973—1974 гг. — период минимума солнечной активности. Весь этот массив данных был сгруппирован по трем сезонам: зима (январь, февраль, ноябрь, декабрь), лето (май, июнь, июль, август) и равноденствие (март, апрель, сентябрь, октябрь).

На рис. 11 показана гистограмма распределения частоты появления «срывов» f_0F_2 по месяцам в периоды максимума и минимума солнечной активности. Из рисунка видно, что в годы максимума солнечной активности частота появления N «срывов» имеет ярко выраженные пики в периоды весеннего и осеннего равноденствия. Наибольшее количество случаев зафиксировано на широтах станции Батагай ($\Lambda_0 \sim 61^\circ$) в месяцы весеннего солнцестояния. На широтах станции Якутск ($\Lambda_0 \sim 56^\circ$) частота появления N «срывов» в годы максимума значительно ниже, чем на станциях высоких широт. В зимние и летние месяцы на всех трех станциях наблюдается заметное уменьшение частоты появления «срывов».

В период минимума солнечной активности (правая часть рис. 11) наблюдается обратная картина распределения частоты появления «срывов», т.е. на станции Тикси ($\Lambda_0 \sim 65^\circ$) регистрируется малое количество случаев «срыва», тогда как в Якутске их число повышается и максимум появления здесь приходится на весенние месяцы. На широтах Батагая фиксируется только относительное уменьшение частоты появления. Следует отметить, что пиковые значения частоты появления «срывов» в весенние и осенние месяцы равноденствия и их уменьшения в зимние и летние месяцы, как было в годы максимума солнечной активности, сохраняются и в годы минимума.

На рис. 12 показана гистограмма распределения частоты появления «срывов» (узких провалов ионизации) в течение суток по сезонам в периоды максимума и минимума солнечной активности. По оси абсцисс приведено местное время LT, по оси ординат — частота появления N. В средней части рисунка указаны инвариантные широты ионосферных станций. Зимой максимум частоты появления срывов f_0F_2 наблюдается в послеполуденно-вечернем секторе ($1500 \div 2000$ LT) как в периоды максимума, так и в периоды минимума солнечной активности. Летом время появления «срывов» смещается к око-

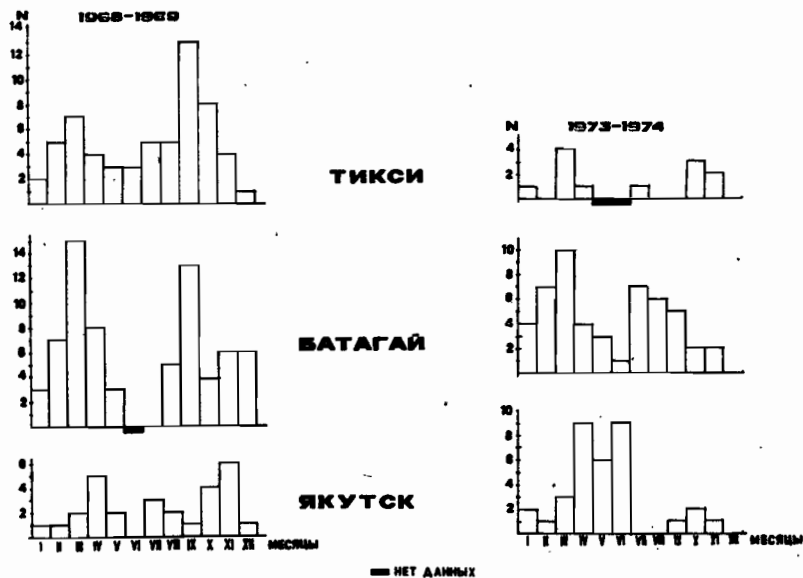


Рис. 11. Гистограмма распределения частоты появления «срывов» f_0F_2 по месяцам в периоды максимума и минимума солнечной активности

лополуночным часам ($2000 \div 0100$ LT), при этом в год минимума солнечной активности наибольшая частота появления «срывов», как было отмечено выше, наблюдается на широтах станций Батагай и Якутск. В период равноденствия диапазон появления «срывов» f_0F_2 достаточно широкий ($1600 \div 2300$ LT), без определенных максимумов.

В годы минимума солнечной активности диапазон времени появления «срыва» меньше, чем в годы максимума и наибольшее число случаев появления наблюдается только на широтах Батагай ($\Lambda_0 \sim 61^\circ$).

Широтно-временное распределение частоты появления узких провалов ионизации, обусловленных быстрыми субавроральными ионными дрейфами, хорошо согласуется с результатами измерений на спутнике АЕ-С [2]. В период максимума солнечной активности наблюдаемые «срывы» происходят при небольших уровнях геомагнитной активности, на что указывает сравнительно высокая частота появления «срыва» на широтах ст. Тикси. В период минимума солнечной активности наблюдае-

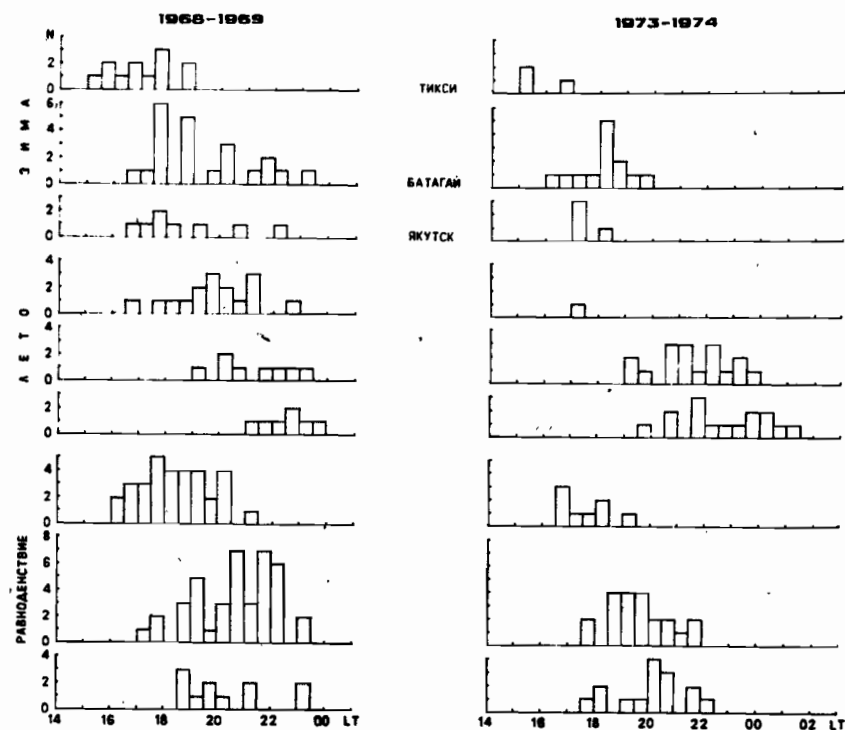


Рис. 12. Гистограмма распределения частоты появления «срывов» в течение суток по сезонам в периоды максимума и минимума солнечной активности

мые «срывы» f_0F_2 регистрируются при достаточно высоком уровне геомагнитной активности, что видно из уменьшения частоты появления «срыва» на ст. Тикси и увеличения частоты появления его на ст. Якутск.

Следует отметить, что летние «срывы» также могут быть обусловлены быстрыми субавроральными ионными дрейфами. Это можно предположить по тому факту, что их сопровождают те же ионосферные признаки, которые были описаны в предыдущих параграфах.

2.4. Долготная протяженность узких провалов ионизации

Для изучения пространственных характеристик узких провалов были использованы оригинальные ионограммы и f -графики, полученные на сети субавроральных и высокоширотных станций (таблица).

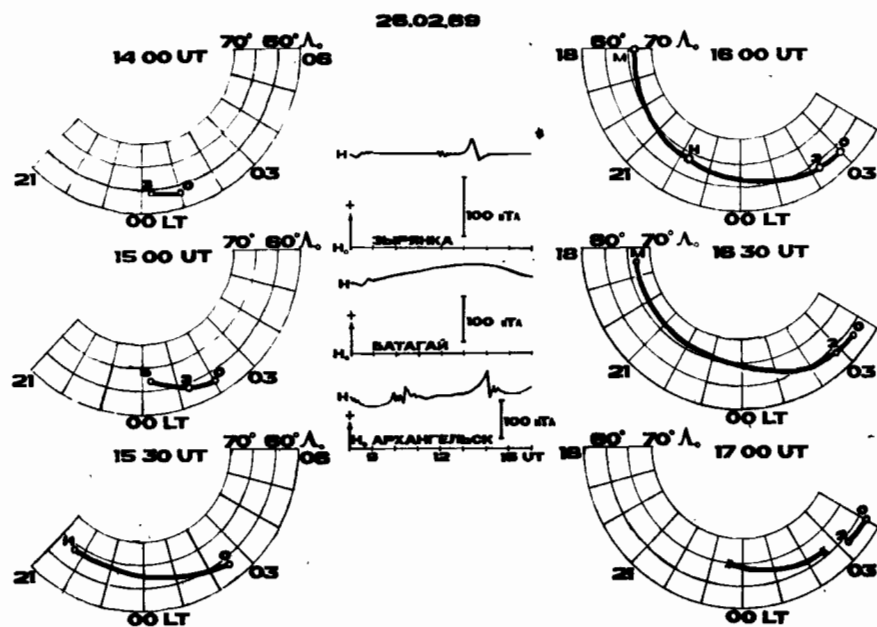


Рис. 13. Результаты одновременных регистраций узких провалов ионизации на сети ионосферных станций (кружки) за 26.02.69 г.; крестики отмечают полярную стенку ГИП

На рис. 13 в системе координат инвариантная широта Λ_0 — местное время LT, в различные моменты мирового времени UT, представлены результаты наблюдений на долготно-разнесенных станциях пространственного протяжения узкого провала ионизации за 26.02.69 г. Из рисунка видно, что в 1400 UT узкий провал (отмечен кружками) одновременно регистрируется на станциях Омолон и Зырянка (местное время 0100 и 0015 соответственно). Через час узкий провал начинает наблюдать станция Батагай (0015 LT); долготная протяженность узкого провала составляет $\sim 30^\circ$. В 1530 UT на станции Норильск (2145 LT) появились следы F_3_s — отражений, т.е. узкий провал в это время имеет, по крайней мере, около 75° долготного протяжения. Наибольшая протяженность, составляющая $\sim 130^\circ$, регистрируется в 1600—1630 UT, когда узкий провал одновременно наблюдается на станциях Мурманск (1800—1830 LT), Норильск (2215—2245 LT), Зырянка (0215—0245 LT) и Омолон (0300—0330 LT). В 1700 UT F_3_s -отражения регистрировались только на станциях Зырянка и Омолон, а на станциях Норильск и Батагай были видны отражения от полярной стенки ГИП (отмечены крестиками). Таким образом, можно предположить,

что в магнитоспокойные периоды (магнитограммы разнесенных станций в средней части рис. 13) узкий провал ионизации существует длительное время (например, на станциях Зырянка и Омолон он наблюдался в течение >3 часов) и имеет спиралевидную конфигурацию, под которую по мере вращения Земли попадают станции, расположенные западнее меридиана Омолон. Тут следует учесть, что моменты появления F_3_s -отражений на ионограммах станций по мировому времени различны для каждой конкретной станции.

Анализ f-графиков субавроральных ионосферных станций за три месяца 1969 г. (наиболее полный период, за который были доступны данные) привел нас к предположению, что пространственная конфигурация узкого провала ионизации существенно разная в дни с различной магнитной активностью. Мы подразделили их на две группы: первая — дни, когда узкий провал существует длительное время и источник, ответственный за формирование узких провалов, неподвижен в магнитосферной системе координат (рис. 13); вторая — когда субпровал имеет большую долготную протяженность (вплоть до $\sim 100^\circ$) и наблюдается одновременно в один и тот же момент мирового времени. На рис. 14, в координатах мирового времени UT — географические долготы (местное время LT) показаны моменты времени «срывов» частоты, зарегистрированных на станциях, расположенных в области инвариантных широт $60 \div 65^\circ$ (таблица). Стрелками на оси абсцисс отмечены долготы станций. Штриховой линией нанесено постоянное местное время или изменение мирового времени в 1700 магнитного местного времени (MLT) в связи с вращением Земли. 1700 MLT выбрано из-за того, что на этот срок в высоких широтах приходится максимум частоты появления «срывов» в суточном ходе. В верхней части рисунка (а) приведены дни первой группы, в нижней части (б) — второй группы. Видно, что в первом случае моменты «срыва» на долготно-разнесенных станциях имели тенденцию появляться в одном секторе MLT ($17 \div 18$ MLT). Результаты, приведенные на рис. 14, б, свидетельствуют о другом характере поведения «срывов». Здесь показаны два примера, когда узкий провал наблюдался почти одновременно на большом долготном протяжении ($\sim 100^\circ$), т.е. конфигурация субпровала приблизительно расположена в диапазоне широт $60 \div 65^\circ$ в большом долготном секторе. Сопоставление результатов, приведенных на рис. 14, с магнитной активностью (с планетарным K-индексом) показало, что измерения, отнесенные к первой группе, приходятся на тот момент времени, когда на этом меридиане ($\sim 17 \div 18$ MLT) не наблюдалось каких-либо геомагнитных активизаций, а измерения, относящиеся ко второй группе, приходи-

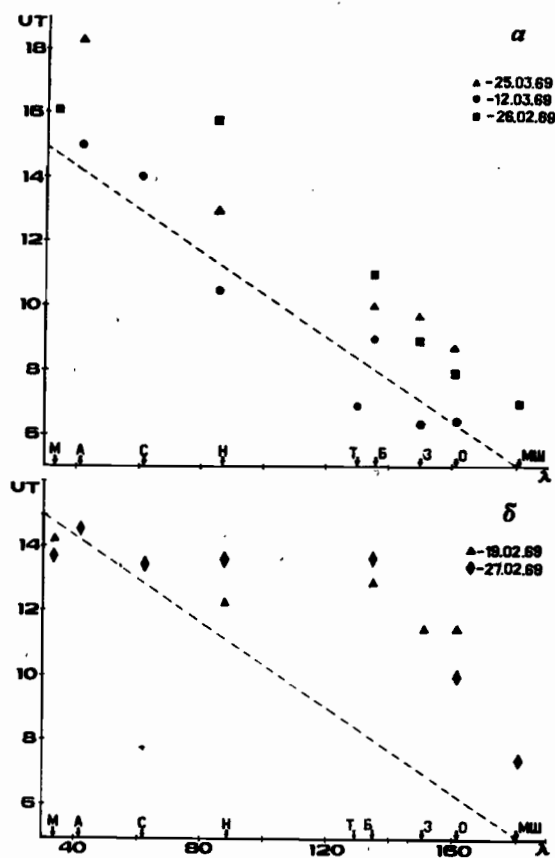


Рис. 14. Результаты регистрации срывов частоты на станциях, расположенных в области инвариантных широт 60—65°. Штриховой линией нанесено постоянное местное время

лись на начало геомагнитной возмущенности. Другими словами, быстрое распространение к западу и локализация в ограниченном широтном диапазоне и в большом долготном секторе узкого провала в один и тот же момент мирового времени связаны с развитием магнитосферной суббури.

2.5. Связь узких провалов с магнитной активностью

Связь моментов появления узких провалов ионизации с текущим уровнем магнитной активности имеет большое значение для выяснения природы возникновения сильных локальных электрических полей на субавроральных широтах. С самого начала развитие поляризационного джета связывалось

с процессами, обусловленными магнитной бурей [1], но эта связь оказалась достаточно сложной и неоднозначной, и, как отмечалось в работе [23], быстрые субавроральные ионные дрейфы иногда наблюдались при спокойной геомагнитной обстановке, определяемой по данным магнитовариационной станции. В некоторые моменты времени развитие поляризационного джета совпадало с началом магнитосферной суббури, определяемой также по магнитометрическим измерениям [9]. О запаздывании времени появления быстрых субавроральных ионных дрейфов на $\sim 10 \div 90$ мин относительно начала магнитосферных суббурь сообщалось в работе [4].

Для изучения этого вопроса нами сначала были сопоставлены магнитограммы станции Жиганск с моментами регистрации «срывов» в суточном ходе f_0F_2 по ионосферным данным этой же станции за 1977—1979 гг. Из 71 сопоставляемого случая за этот период в 19 случаях поляризационный джет развивается при спокойном уровне магнитной активности, в 29 случаях момент регистрации начала «срыва» в пределах 1 ч совпадает с появлением положительной бухты в Н-компоненте геомагнитного поля в вечернем секторе и в 23 случаях начало «срыва» в вечернем секторе наблюдается при развитии магнитосферной суббури в полуденном секторе.

Известно, что записи МВС на данном меридиане могут и не реагировать на магнитосферные суббури, происходящие в других долготных секторах, поэтому «срывы» в суточном ходе f_0F_2 , зарегистрированные в спокойный период по записям МВС, были сопоставлены со значениями АЕ-индекса. Результаты сопоставления 19 таких случаев показали, что в 3 случаях «срывы» наблюдались в спокойные периоды, в 3 случаях бухты АЕ-индекса с амплитудой > 150 нТл наблюдались через 1—2 ч после регистрации «срывов», а в остальных случаях развитие узких провалов ионизации происходило при значениях АЕ-индекса, превышающих ~ 150 нТл.

Таким образом, анализ геофизической обстановки в периоды регистрации узких провалов ионизации показал, что их появление связано с усилением магнитной активности и (или) с развитием магнитосферных суббурь на полуденном меридиане.

На рис. 15,а представлена вероятность появления узких провалов ионизации в зависимости от уровня магнитной активности, характеризуемой суточной суммой индекса K_p , для различных станций. Из рисунка видно, что наибольшая вероятность появления узких провалов наблюдается для высокоширотной станции Тикси ($L \sim 5,6$) при малом уровне магнитной активности. Для более экваториальных станций Батагай ($L \sim 4$) и Якутск ($L \sim 3$) эта вероятность уменьшается, и узкие провалы

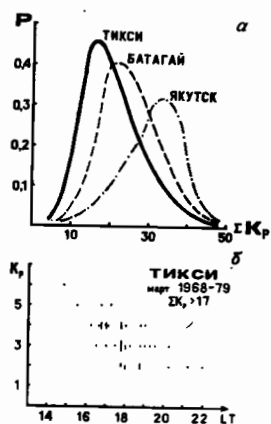


Рис. 15. Вероятность появления «срывов» f_0F_2 на станциях Якутской цепочки (а) и суточный ход появления «срывов» (б) в зависимости от уровня геомагнитной активности

ионизации регистрируются при более высоком уровне магнитной возмущенности. Такая зависимость характерна для явлений, связанных с экваториальной границей аврорального овала и движущихся в сторону низких широт с усилением магнитной активности. Отсюда можно сделать вывод о том, что механизмы образования узких провалов ионизации действительно связаны с процессами, происходящими вблизи проекции плазмопаузы.

На рис. 15,б показан суточный ход вероятности появления узких провалов ионизации для станции Тикси в период равенства 1968—1979 гг. в зависимости от уровня магнитной активности. Видно, что с ростом K_p -индекса узкие провалы регистрируются в более ранние часы, вплоть до ~15 LT.

Для изучения связи моментов регистрации развития узких провалов ионизации с началом магнитосферных суббурь нами также сопоставлены времена развития срывов в суточном ходе f_0F_2 с периодами появления геомагнитных пульсаций типа Pi2, отождествляемых с началом магнитосферных суббурь [36]. На рис. 16 приведена гистограмма случаев появления «срывов» f_0F_2 для станции Тикси за 1979 г. в зависимости от Δt (часы), определяемой как разность времени между регистрацией пульсаций типа Pi2 на станции Якутск и моментом появления узких провалов: $\Delta t = t_{Pi2} - t_{\text{срыва}}$. Для анализа были выбра-

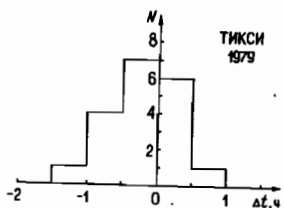


Рис. 16. Гистограммы распределения частоты появления «срывов» в зависимости от времени начала магнитосферной суббури

ны срывы, происходившие в неосвещенной ионосфере на высотах области F. Из рисунка видно, что в пределах 1 ч моменты начала обоих явлений совпадают (при этом следует учесть, что регистрация «срывов» происходит 1 раз в 15 мин), хотя существует некоторая тенденция опережения по времени начала регистрации пульсаций типа Pi2. Следовательно, результаты этого сопоставления также указывают на то, что процессы, ответственные за возникновение сильных электрических полей, формирующих узкие провалы ионизации, связаны с развитием магнитосферных суббурь.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сопоставления спутниковых данных, когда по измерениям на борту регистрировались быстрые западные ионные дрейфы или направленные на север сильные электрические поля, с наземными ионосферными наблюдениями позволили выявить «автограф» — ионосферные признаки «поляризационного джета». К основным ионосферным признакам относятся F₃-отражения на ионограммах ВЗ и ВНЗ и «срывы», или резкие уменьшения за короткий интервал времени (15 ÷ 30 мин) критических частот (на 2 ÷ 4 МГц и более) в их суточном ходе. Существуют еще и дополнительные признаки: появление диффузности и расщеплений следов отражений на ионограммах и развитие явления типа «лакуна». Выделенные ионосферные признаки указывают на то, что при возникновении локализованных по широте сильных электрических полей, направленных к полюсу и приводящих к возникновению узкой полосы быстрого ионного дрейфа, формируется узкий провал ионизации. Это выражается в малых значениях частот следов F₃-отражений или в резком уменьшении критической частоты фонового слоя F при «наплывании» узкого провала ионизации в зенит станции наблюдения.

В послеполуденные и в ранние вечерние часы появление быстрых ионных дрейфов, направленных к западу, является единственным механизмом формирования ионосферного провала на фоне высокой дневной ионизации. В неосвещенной ионосфере появление быстрых западных дрейфов приводит к углублению главного ионосферного провала, образованного под действием известных механизмов, т.е. к появлению «провала в провале».

Измерения методом DI показали, что в области узкого провала резко возрастают скорости конвекции ионосферной плазмы (до ~800 м/с) к западу. По спутниковым измерениям («Космос-900») показано, что узкие провалы являются устойчивой структурой в субав-

роральной ионосфере и пространственно совпадают с резкими увеличениями электронной температуры. Идентификация узких провалов ионизации по «срывам» на f-графиках позволила провести статистический анализ их частоты появления для разных уровней солнечной активности. Показано, что частота появления узких провалов имеет максимум в периоды весеннего и осеннего равноденствия с наибольшей частотой появления на широтах Батагая ($\Lambda_0 \sim 61^\circ$) в послеполуночные вечерние часы, что согласуется с результатами измерений на спутнике АЕ-С[2]. В период максимума солнечной активности «срывы» встречаются при небольших уровнях геомагнитной активности, а в период минимума солнечной активности — при достаточно высоком уровне геомагнитной активности.

Узкий, провал ионизации имеет спиралевидную форму протяженностью по долготе $\sim 130^\circ$, а пространственно располагается экваториальнее полярной стенки ГИП. Разница по широте между положением узкого провала и полярной стенки ГИП наибольшая в начальный момент одновременной регистрации в вечернем секторе и наименьшая в полуночном секторе, т.е. скорость меридионального смещения полярной стенки ГИП больше, чем такое же смещение узкого провала ионизации.

Изучение моментов появления узких провалов ионизации, охватывающее данные станций, разнесенных на большом долготном секторе, показало, что имеется два типа формирования узкого провала: первый тип, когда узкий провал существует длительное время и источник, ответственный за формирование узких провалов, неподвижен в магнитосферной системе координат; второй, когда узкий провал имеет большую долготную протяженность в один и тот же момент мирового времени (вплоть до $\sim 100^\circ$) и связан с развитием магнитосферной суббури.

На связь с магнитной активностью указывает также тот факт, что при увеличении магнитной активности максимум частоты появления узких провалов смещается от высоких широт к низким и с увеличением K_p время появления субпровала смещается в более ранние вечерние и послеполуночные часы.

В настоящее время в литературе обсуждается несколько возможных механизмов генерации интенсивных локальных электрических полей, направленных к полюсу, вблизи проекции плазмопаузы [37—40].

Мы надеемся, что приведенные в данной работе характеристики узких провалов ионизации могут дать полезную информацию при выборе того или иного механизма генерации таких электрических полей.

Авторы выражают глубокую признательность К.Бегену и А.М.Перликову за предоставление данных по широтному распределению N_s , полученных по измерениям на приборе «Изопроб».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гальперин Ю.И., Пономарев В.Н., Зосимова А.Г. Прямые измерения скорости дрейфа ионов в верхней ионосфере во время магнитной бури // *Космич. исслед.* — 1973. — Т. 11, вып. 2. — С. 273—296.
2. Spiro R.W., Heelis R.A., Hanson W.B. Rapid Subauroral Ion Drifts Observed by Atmospheric Explorer C // *Geophys. Res. Lett.* — 1979. — V. 6, N 8. — P. 660—675.
3. Buthrow P.F., Heelis R.A., Hanson W.B., Power R.A., Simultaneous Observations of Field-Aligned Currents and Plasma Drift Velocities by Atmospheric Explorer // *J. Geophys. Res.* — 1980. — V. 85, N A1. — P. 151—159.
4. Maynard N.C., Aggson T.L., Heppner J.P. Magnetospheric Observation of Large Sub-Auroral Electric Fields // *Geophys. Res. Lett.* — 1980. — V. 7, N 11. — P. 881—884.
5. Rich F.J., Burke W., Kelley M., Smiddy M. Observation of Field-Aligned Currents in Association with Strong Convection Electric Fields at Subauroral Latitudes // *J. Geophys. Res.* — 1980. — V. 85, N A5. — P. 2335—2340.
6. Mikkelsen I.S., Jorgensen T.S., Kelley M.C. et al. Neutral Winds and Electric Fields in the Dusk Auroral Oval. I. Measurements // *J. Geophys. Res.* — 1981. — V. 86, N A3. — P. 1513—1535.
7. Robinson R.M., Vondrak R.R., Potemra T.A. Electrodynamic Properties of the Evening Sector Ionosphere within the Region 2 Field-Aligned Current Sheet // *J. Geophys. Res.* — 1981. V. 87, N A2. — P. 731—741.
8. Bourdillon A., Nicollet M., Parent J. Velocity Characteristics of F-Region Irregularities at Sub-Auroral Latitudes // *Geophys. Res. Lett.* — 1982. — V. 9, N 6. — P. 696—699.
9. Bourdillon A. Spectral Characteristics of High Frequency Waves Backscattered by Small-Scale F-Region Irregularities: Evidence of Strong Subauroral Ion Flow // *J. Atmos. Terr. Phys.* — 1986. — V. 48, N 8. — P. 703—714.
10. Smiddy M., Burke W., Sagalyn E. et al. Intense Poleward Directed Electric Fields near the Ionospheric Projection of the Plasmapause // *Geophys. Res. Lett.* — 1977. — V. 4, N 11. — P. 543—546.
11. Maynard N.G. On Large Poleward Directed Electric Fields at Subauroral Latitudes // *Geophys. Res. Lett.* — 1978. — V. 5, N 7. — P. 617—618.
12. 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 // *Космич. исслед.* — 1977. — Т. 15, вып. 5. — С. 708—724.
13. Шульгина Н.В. Спорадические образования в F-области // *Авроральные явления 70* — II. — Апатиты: изд. КФ АН СССР, 1974. — С. 44—46.
14. Бенькова Н.П., Козлов Е.Ф., Саморокин Н.И., Гальперин Ю.И., Беген К. Двумерная картина распределения электронной плотности в районе главного ионосферного провала и диффузной авроральной зоны по данным сети близкорасположенных ионосферных станций: сравнение с измерениями на спутнике «Ореол-3». Препринт № 34(567) ИЗМИРАН. — М., 1985. — 32 с.
15. Bowman G.G. Ionization Troughs below the F2-Layer Maximum // *Planet. Space Sci.* — 1969. — V. 17. — P. 777—796.
16. Sugiura M., Iyemori T., Hoffman R.A. et al. Relationships between Field-Aligned Currents, Electric Fields and Particle Precipitation as Observed by Dynamics Explorer-2. NASA Technical Memorandum 85025. May 1983. — 22 p.
17. Беспрозванная А.С. Ионосферный провал и его связь с крупномасштабными структурными особенностями магнитосферной плазмы // *Phys. Solar-Terr.* — 1984. — № 24. — P. 25—42.
18. Бенькова Н.П., Зыряч Э.К. Главный ионосферный провал по наземным наблюдениям в Якутском регионе // *Физические процессы в области главного ионосферного провала. КАИГ-проекты № 5 и 6.* — Прага, 1983. — С. 7—18.

19. Решетников Д.Д., Соловьев В.С., Филиппов В.М. Измерительный комплекс пространственно-разнесенного приема с малой базой (метод DI) в Якутске, Жиганске, Тикси // Комплексные исследования авроральной и субавроральной ионосферы. — Якутск: изд. ЯФ СО АН СССР, 1983. — С. 118—123.
20. Филиппов В.М., Решетников Д.Д., Соловьев В.С. и др. Наблюдения методом DI полюсы субаврорального ионного дрейфа // Комплексные исследования полярной ионосферы. — Апатиты: изд. КФ АН СССР, 1987. — С. 45—48.
21. Гальперин Ю.И., Рем А. Исследования магнитосферно-ионосферных процессов в советско-французском проекте «Аркад-3» // Магнитосферные исследования. — 1985. — № 7. — С. 79—89.
22. 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 // Космич. исслед. — 1977. — Т. 15, № 3. — С. 421—434.
23. Сивцева Л.Д., Филиппов В.М., Халипов В.Л. и др. Исследования среднеширотного провала с помощью наземных геофизических методов и синхронных измерений со спутников // Космич. исслед. — 1983. — Т. 21, № 4. — С. 584—608.
24. Беляшин А.П., Гдалевич Г.Л., Жданов В.И., Озеров В.Д. Аппаратура и методика измерений неоднородностей концентрации при помощи установленной на спутнике «Космос-900» ловушки с «плавающим» потенциалом внешней сетки // Космическое приборостроение. — М.: Наука, 1981. — С. 54—59.
25. Evans J.V., Holt J.M., Oliver W.L., Wand R.H. The Fossil Theory of Nighttime High-Latitude F-Region Troughs // J.Geophys. Res. — 1983. — V. 88, N A10. — P. 7769—7782.
26. Schlegel K. A Case study of a High-Latitude Ionospheric Electron Density Depletion // J. Atmos. Terr. Phys. — 1984. — V. 46, N 6/7. — P. 517—520.
27. Maehlum B.N., Hansen T., Brekke A. Preliminary Results from a Study of the F-Region Heating during an Intense Aurora Observed by EISCAT // J. Atmos. Terr. Phys. — 1984. — V. 46, N 6/7. — P. 619—623.
28. Horwitz J.L., Brace L.H., Comfort R.H., Chappell C.R. Dual-Spacecraft Measurements of Plasmasphere-Ionosphere Coupling // J. Geophys. Res. — 1986. — V. 91, N A10. — P. 11203—11216.
29. Сивцева Л.Д., Филиппов В.М., Халипов В.Л. и др. Координированные исследования процессов в субавроральной верхней ионосфере и провала концентрации легких ионов // Космич. исслед. — 1984. — Т. 22, вып. 5. — С. 720—741.
30. Шафер Ю.Г., Гальперин Ю.И., Пономарев Е.А. Некоторые вопросы планирования совместных спутниковых и наземных исследований // Верхняя атмосфера высоких широт. — Якутск: изд. ЯФ СО АН СССР, 1969. — С. 9—59.
31. Руководство URSI по интерпретации и обработке ионограмм. М.: Наука, 1977. — 342 с.
32. Olesen J.K., Stanning P., Tsunoda R.T. On a Unified Interpretation of the Polar Slant E Condition (SEC) and Other High E Field Related Phenomena. Geophys. medd. Dan. Meteorol. Inst. 1986. N 75. — 30 p.
33. Брюнелли Б.Е. Резкие обеднения F-области ионосферы вблизи восточной электроструи // Физические процессы в области главного ионосферного провала. КАИП-проекты № 5 и 6. — Прага, 1983. — С. 93—98.
34. Брюнелли Б.Е. Ионосфера у западной границы аврорального овала // Высокоширотная ионосфера и магнитосферно-ионосферные связи. — Апатиты: изд. КФ АН СССР, 1986. — С. 71—77.
35. Беспрозванная А.С., Пирог О.М., Щука Т.И. Широко-временные особенности послеполуденной ионизации слоя F2 по данным меридиональной цепочки ионосферных станций // Геомагнетизм и аэрномия. — 1986. — Т. 24, № 2. — С. 320—322.
36. Гульельми А.В., Троицкая В.А. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы. — М.: Наука, 1973. — 208 с.
37. Banks P.M., Yasuhara F. Electric Fields and Conductivity in the

Nighttime F-Region: a New Magnetosphere-Ionosphere-Atmosphere Coupling Effect // Geophys. Res. Lett. — 1978. — V. 5, N. 12. — P. 1047—1050.

38. Southwood D.J., Wolf R.A. An Assessment of the Role of Precipitation in Magnetospheric Convection // J. Geophys. Res. — 1978, — V. 83, N A11. — P. 5227—5232.

39. Волков М.А., Мальцев Ю.П. Желобковая неустойчивость внутренней границы плазменного слоя // Геомагнетизм и аэрномия, — 1986. — Т. 26, № 5. — С. 798—801.

40. Дёминов М.Г., Ким В.П., Шубин В.Н. Электрические поля в неосвещенной субавроральной ионосфере. Препринт № 56(670) ИЗМИРАН. — М., 1986. — 20 с.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр
Введение	3
1. Сопоставление одновременных спутниковых и наземных измерений в области полосы быстрых субавроральных ионных дрейфов	4
1.1. Определение «автографа» поляризационного джета на наземных ионограммах	4
1.2. Сопоставления динамики высотно-широтных профилей ионизации F-области с параметрами ионосферы, измеренными со спутников	7
2. Морфологические характеристики узких провалов ионизации по наземным данным	20
2.1. Динамика изменения ионограмм на сети станций ВЗ при «напылении» на них узкого провала ионизации	20
2.2. Идентификация узких провалов по f-граммам	23
2.3. Суточные и сезонные распределения частоты появления узких провалов ионизации	25
2.4. Долготная протяженность узких провалов ионизации	27
2.5. Связь узких провалов с магнитной активностью	30
Заключение	33
Список литературы	35

Препринт

МОРФОЛОГИЯ И ДИНАМИКА УЗКИХ ПРОВАЛОВ ИОНИЗАЦИИ В СУБАВРОРАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ F

Утверждено к печати президиумом Якутского филиала
Сибирского отделения АН СССР

Редактор *Т.П.Шкулепо*
Техн. редактор *Д.Д.Пестерев*

Подписано в печать 25.08.87 г. МЛ 02460. Формат 60x84 1/16.
Бум. тип. № 3. Гарнитура журнальная. Печать офсетная.
Усл. п.л. 2,33. Уч.-изд.л. 2,87 Тираж 200 экз. Заказ 32. Цена 28 коп.

Якутский филиал Сибирского отделения АН СССР
ПОП Якутского филиала СО АН СССР
677891, г. Якутск, ул. Петровского, 2