

УДК 550.388.2, 550.385.36

СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СУБАВРОРАЛЬНОЙ ИОНОСФЕРЫ ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ДЖЕТА

© 2011 г. А. Е. Степанов¹, И. А. Голиков², В. И. Попов², Е. Д. Бондарь¹, В. Л. Халипов³

¹Учреждение РАН Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск

²Якутский Государственный университет им. М.К. Аммосова, Якутск

³Учреждение РАН Институт космических исследований, Москва

e-mail: a_e_stepanov@ikfia.ysn.ru

Поступила в редакцию 16.02.2010 г.

После доработки 18.10.2010 г.

Узкие струи быстрых ионных дрейфов к западу вблизи проекции плазмопаузы на высотах области F впервые были зарегистрированы на спутнике “Космос-184” и получили название “поляризационный джет”. В данной работе исследовано влияние поляризационного джета на структуру ионосферы с помощью трехмерной модели высокоширотной ионосферы при возникновении сильных локальных электрических полей магнитосферного происхождения. Расчеты показали, что на месте включения электрического поля формируется узкий провал в широтном ходе электронной концентрации максимума F -области. Узкий провал более выражен в ранние вечерние часы, когда фоновая концентрация электронов еще высока, и менее выражен при низких уровнях фона в предполуденные часы. Сопоставление результатов расчетов и экспериментальных данных показало хорошее их согласие, что позволяет говорить о поляризационном джете как об основном механизме формирования узких провалов электронной концентрации в субавроновой ионосфере.

1. ВВЕДЕНИЕ

Узкие струи быстрых ионных дрейфов к западу вблизи проекции плазмопаузы на высотах области F впервые были зарегистрированы на советском спутнике “Космос-184” и получили название “поляризационный джет” (ПД) [Гальперин и др., 1973; Galperin et al., 1974]. В дальнейшем это явление было обнаружено по наблюдениям с других спутников, измерениям наземных станций некогерентного рассеяния радиоволн, а также по измерениям ионосферных станций [Smiddy et al., 1977; Southwood and Wolf, 1978; Spiro et al., 1979; Galperin et al., 1986; Филиппов и др., 1987; 1989; Anderson et al., 1993; Foster et al., 1994; Karlsson et al., 1998; Халипов и др., 2001; Anderson et al., 2001; Galperin, 2002; Khalipov et al., 2003]. В некоторых работах для обозначения ПД использовались термины SAID, (Sub-Auroral Ion Drift) и SAEF, (SubAuroral Electric Fields).

Все эти наблюдения, если кратко их просуммировать, показали, что

– на экваториальной проекции ПД регистрируется повышенное электрическое поле северного направления напряженностью $\sim 30\text{--}100$ мВ/м ($\sim 600\text{--}2000$ м/с) и более, и разницей потенциалов через полосу ~ 10 кВ;

– время формирования ПД составляет $\sim 5\text{--}10$ мин в околополуденном MLT секторе после резкого возрастания уровня геомагнитной возмущенности;

– ширина полосы ПД на ионосферных высотах составляет $1\text{--}2$ градуса;

– наблюдается западное перемещение разрыва Харанга вблизи меридиана инжекции частиц на несколько сотен километров, сопровождающее ПД событие;

– педерсеновская проводимость в субавроновой ионосфере оценивается в ~ 0.1 см;

– время жизни ПД в квазиспокойной стадии $\sim 1\text{--}3$ ч;

– полоса ПД локализуется в вечерне-ночном MLT секторе;

– частота появления ПД имеет пик в равноденственные месяцы.

Основная идея физического объяснения поляризационного джета была выдвинута в работах [Smiddy et al., 1977; Southwood and Wolf, 1978]. Она рассматривает инжекцию энергичных ионов во внутреннюю магнитосферу во время суббури в околополуденном секторе и их более глубокое проникновение в сторону Земли в предполуденном и вечернем секторах вследствие бетатронного ускорения ионов в их дрейфовом движении при наличии западной электрической компоненты поля.

В соответствии с этой моделью поляризационный джет создается электрическим полем, направленным к полюсу, которое генерируется зарядами энергичных ионов на экваториальной границе их проникновения. В этом случае естественно ожидать быстрого возникновения этого эффекта в око-

лополуночном секторе или, что более точно, около меридиана инъекции. Далее, когда популяция инжектированных горячих ионов дрейфует по долготе на запад, ее запаздывающее развитие должно наблюдаться в вечернем секторе.

2. ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ И МОДЕЛЬНЫЕ РАСЧЕТЫ

2.1. Ионозондовые измерения

Экспериментальные исследования поляризованного джета наземными методами сопряжены с определенными трудностями, такими как сложность интерпретации полученных данных и отсутствие общепринятой методики обработки. По сопоставлению одновременных комплексных спутниковых и наземных измерений (по данным Якутской цепочки ионосферных станций Якутск–Жиганск–Тикси) было выявлено, что появление полосы быстрого дрейфа ионосферной плазмы к западу обусловлено развитием интенсивного (более 30 мВ/м) направленного к полюсу электрического поля вблизи проекции плазмопаузы [Galperin et al., 1986; Филиппов и др., 1987; 1989; Халипов и др., 2001]. Такое поле приводит к формированию узких (100–200 км) и глубоких ($\leq 10^4$ см⁻³) провалов ионизации в области главного ионосферного провала. Таким образом, развитие ПД на высотах ионосферы вызывает значительное уменьшение критических частот и подъем F_2 -слоя и довольно хорошо определяется по измерениям ионозондов. Анализ ионограмм, полученных в моменты развития ПД вблизи зенита станции наблюдения показал, что в эти периоды происходит резкое уменьшение критической частоты foF_2 на 2–4 МГц и более за короткий интервал времени 15–30 мин. Во время развития ПД на ионограммах ионосферных станций, появляются дополнительные следы отражений, классифицируемые как отражения F_3s [Шульгина, 1974], которые являются основным ионосферным признаком ПД [Galperin et al., 1986].

На рисунке 1 приведена ионограмма ст. Якутск от 21 ноября 2002 г. в 07:45 UT (16:45 LT), в которой зарегистрирован след от F_3s . Отражения F_3s характеризуются малыми значениями частот и большими значениями действующих высот, чем регулярный слой F_2 . Наиболее заметное влияние ПД при достаточно высоком уровне геомагнитной активности ($Kp > 3-5$), проявляется на суточных f -графиках в виде резкого понижения критических частот F_2 -слоя (“срыв” частоты) и повышения высоты $h'F$.

На рисунке 2 для примера показаны суточные зависимости foF_2 и $h'F$ по данным ст. Якутск за 4 марта 2003 г. Здесь тонкой линией для сравнения показан прогностический ход критических частот foF_2p по модели IRI [Bilitza and Reinisch, 2008]. Видно, что резкое понижение частоты и повышение высот отражений регистрируется во время наблю-

дения на станции признаков ПД. Интервал наблюдения ПД (с 9:15 до 10:00 UT) на рисунке отмечен отрезком прямой, во время которого “срыв” частоты составил ~4 МГц.

Косвенными признаками ПД на ионограммах могут являться также появление диффузности и расслоений слоев, явление “лакуны” и 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.

2.2. Результаты расчетов и сопоставление с экспериментальными данными

В высоких широтах важную роль в формировании структуры и динамики ионосферы играет перенос плазмы. Поэтому в модельных расчетах всегда ставится задача решения системы трехмерных моделирующих уравнений, учитывающих как вертикальный, так и горизонтальный перенос ионосферной плазмы. Используемая нами математическая модель области F высокоширотной ионосферы с учетом несовпадения географических и геомагнитных координат и учетом теплового режима построена на основе системы уравнений гидродинамики в переменных Эйлера. Ионосферная плазма в области высот 120–500 км может быть описана в гидродинамическом приближении следующими характеристиками: концентрацией ионов $N(O^+)$, электронов ($N_e \approx N(O^+)$), нейтральных составляющих и их температурами, а также компонентами скоростей O^+ и электронов. Плотность N_e в модели зависит от потока солнечного радиоизлучения $F_{10.7}$ и планетарного геомагнитного индекса A_p .

Более подробно трехмерная модель высокоширотной ионосферы описана в следующих работах: [Колесник и Голиков, 1982; Колесник и др., 1993; Чернышев и Заболоцкий, 1994; Голиков и др., 2005]. В работе [Голиков и др., 1985] проведено сопоставление модельных расчетов с экспериментальными данными Якутской меридиональной цепочки ионозондов для зимних условий в период низкой солнечной активности. Показано, что пространственно-временное распределение электронной концентрации в максимуме области F имеет достаточно хорошее качественное и количественное согласие с эмпирической моделью, что говорит об адекватности трехмерной модели высокоширотной ионосферы.

В данной работе проведено исследование влияния поляризованного джета на структуру субавроральной ионосферы по результатам численного моделирования. Для этого в модельных расчетах дополнительно задавались параметры локальных электрических полей магнитосферного происхождения: электрическое поле северного направления

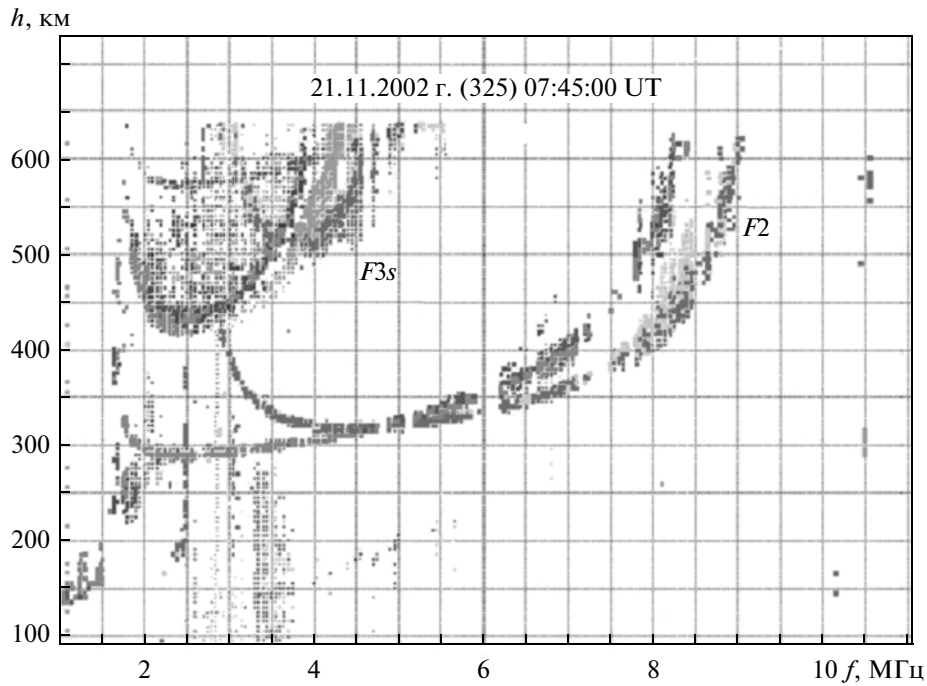


Рис. 1. Ионограмма ст. Якутск от 21 ноября 2002 г. в 07:45 UT. Характерный дополнительный след на ионограмме (обозначен как $F3s$) – ионосферный признак поляризационного джета.

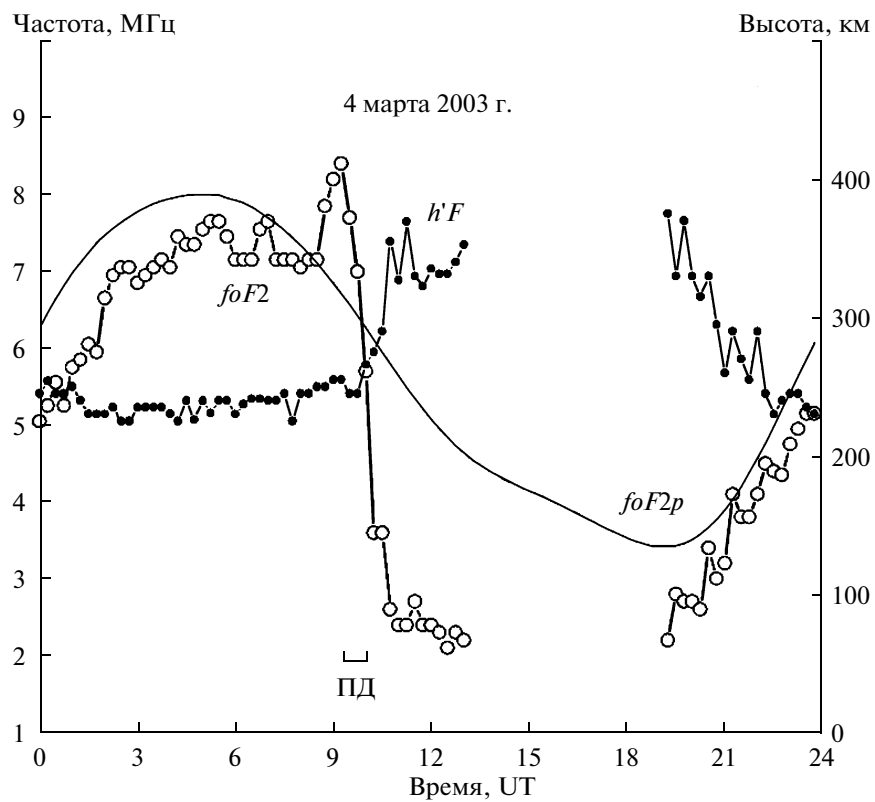


Рис. 2. Суточные хода $foF2$ и $h'F$ по данным ст. Якутск за 4 марта 2003 г. Тонкая линия – прогностический ход критических частот $foF2p$. Отрезком прямой отмечен интервал наблюдений ПД на ионограммах.

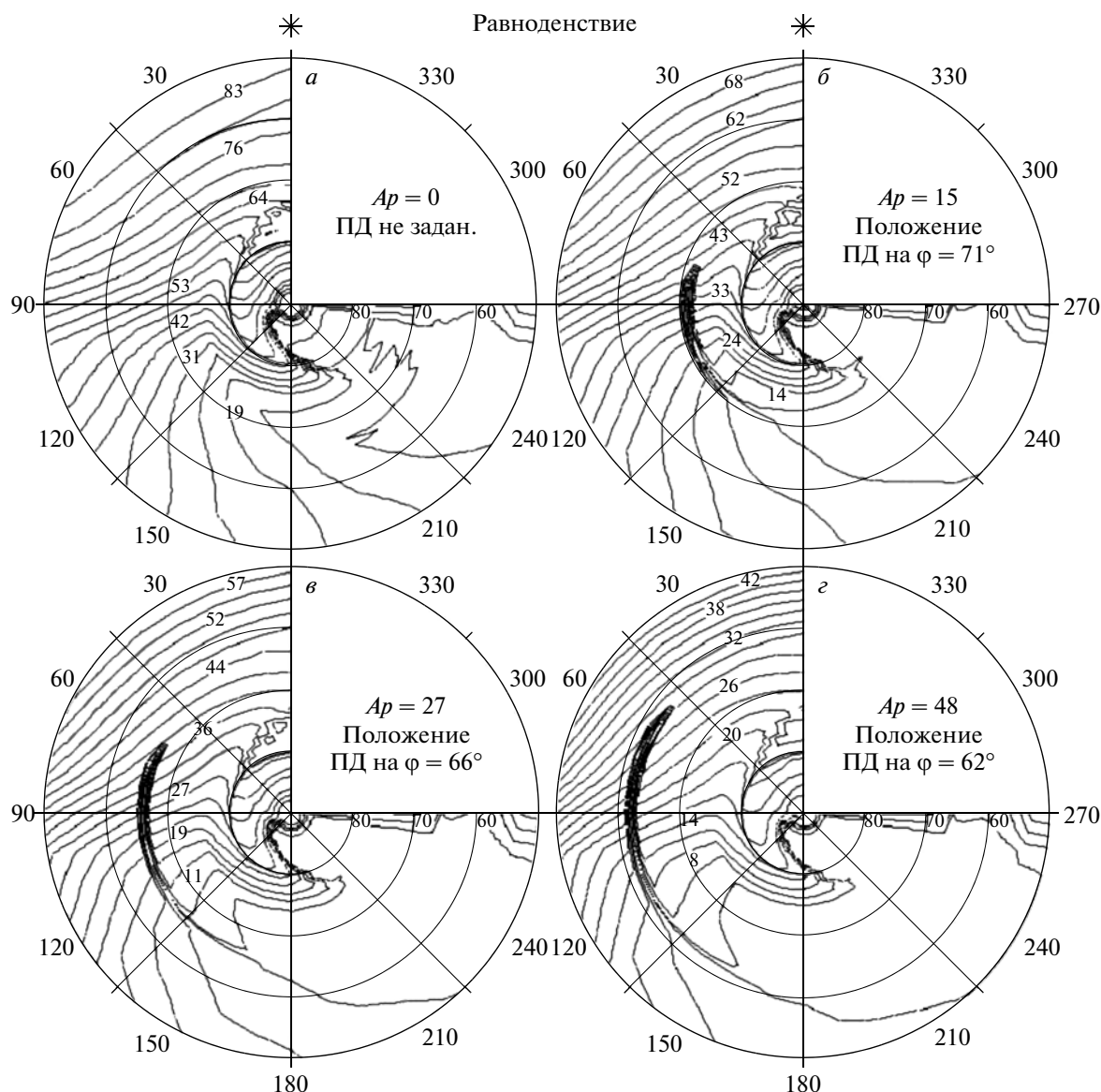


Рис. 3. Картины изолиний равной электронной концентрации N_e (в ед. 10^4 см^{-3}):

a – спокойный период равноденствия без включения дополнительного локального электрического поля;

b, v, z – изолинии при E_{\perp} равном 25.5, 51 и 76.5 мВ/м, или при скоростях западного дрейфа 500, 1000 и 1500 м/с.

шириной 1–2 градуса и значениями поля от 5 до 100 мВ/м. Сами фоновые модельные значения напряженности электрического поля E_{\perp} на субавроральных широтах составляют около 5 мВ/м.

Положение электрического поля может задаваться на определенной широте и долоте (MLT). Для расчетов на модели рассматривались средневозмущенные интервалы геомагнитной активности ($Kp = 3-5$ или $Ap \geq 15$) в условиях равноденствия.

Модельные расчеты с включением дополнительного локального электрического поля показали существенно изменившуюся структуру субавроральной ионосферы – в области главного ионосферного провала формируется и наблюдается уз-

кий и глубокий провал. Формирование такого субпровала в работах [Гальперин и др., 1973; Филиппов и др., 1987; 1989] объясняется выносом ионосферной плазмы на дневную сторону при сильных электрических полях и изменением скоростей фотохимических реакций ионов и нейтральных частиц.

На рисунке 3 в географической системе координат приведены изолинии равной электронной концентрации N_e (в ед. 10^4 см^{-3}). Спокойный период равноденствия без включения дополнительного локального электрического поля показан на рис. 3 (a), а последующие картины этого же периода (b, v, z) показывают изолинии при E_{\perp} , равном 25.5, 51 и 76.5 мВ/м, или при скоростях западного дрейфа

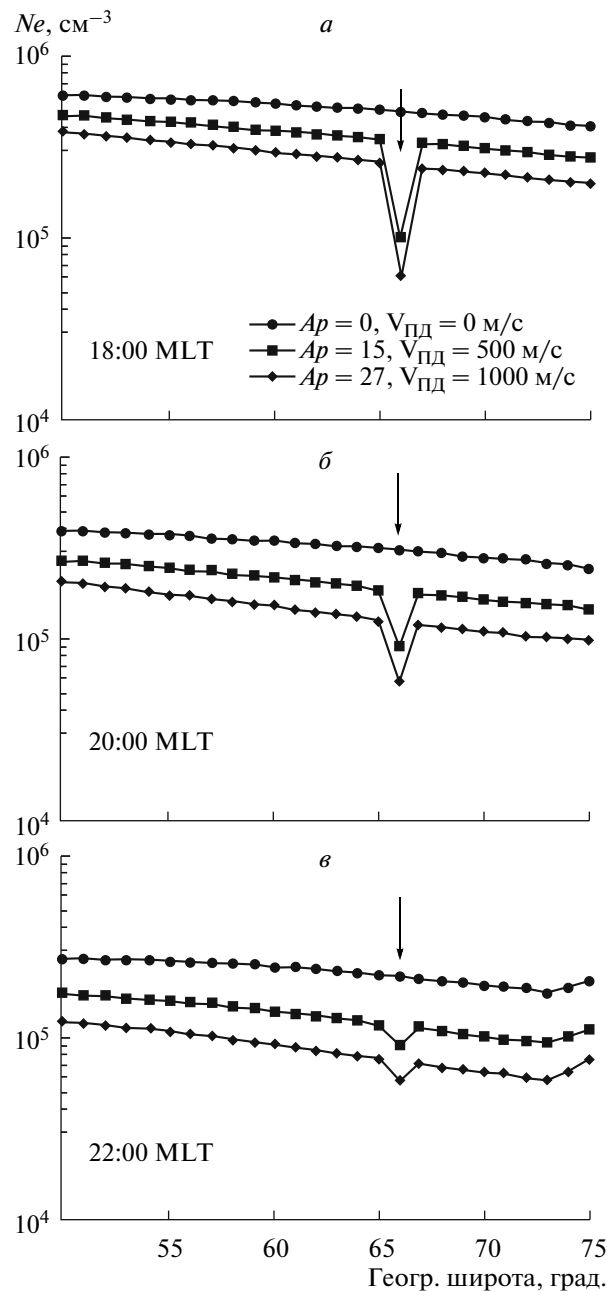


Рис. 4. Широтные профили N_e в 18:00, 20:00 и 22:00 MLT при трех значениях скоростей.

500, 1000 и 1500 м/с. Положения поляризационного джета для расчетов были локализованы на широтах станций Тикси, Жиганск и Якутск соответственно, и при этом увеличивались значения геомагнитной возмущенности ($Kp = 30, 40$ и 50). Из рисунка видно, что на месте включения сильных электрических полей возникают сгущения изолиний, свидетельствующие об усилении скоростей западного дрейфа ионосферной плазмы и формировании здесь узких и глубоких провалов в N_e . Широтные профили N_e в 18:00, 20:00 и 22:00 MLT показаны на рис. 4 при трех значениях скоростей. Положение ПД на широте 66°

отмечено стрелкой. Отметим, что узкие провалы в N_e наиболее выражены при высоких фоновых значениях N_e , т.е. в ранние вечерние часы MLT, и менее выражены при низких уровнях фона в предполуденные часы.

Результаты сопоставления модельных расчетов с экспериментальными данными наземных станций ионосферного зондирования приведены на рис. 5. За конкретные дни весеннего равноденствия ПД в двух случаях регистрировался вблизи зенита ст. Тикси, а еще в двух — ст. Жиганск. Здесь по оси абсцисс отложены географические широты, а по

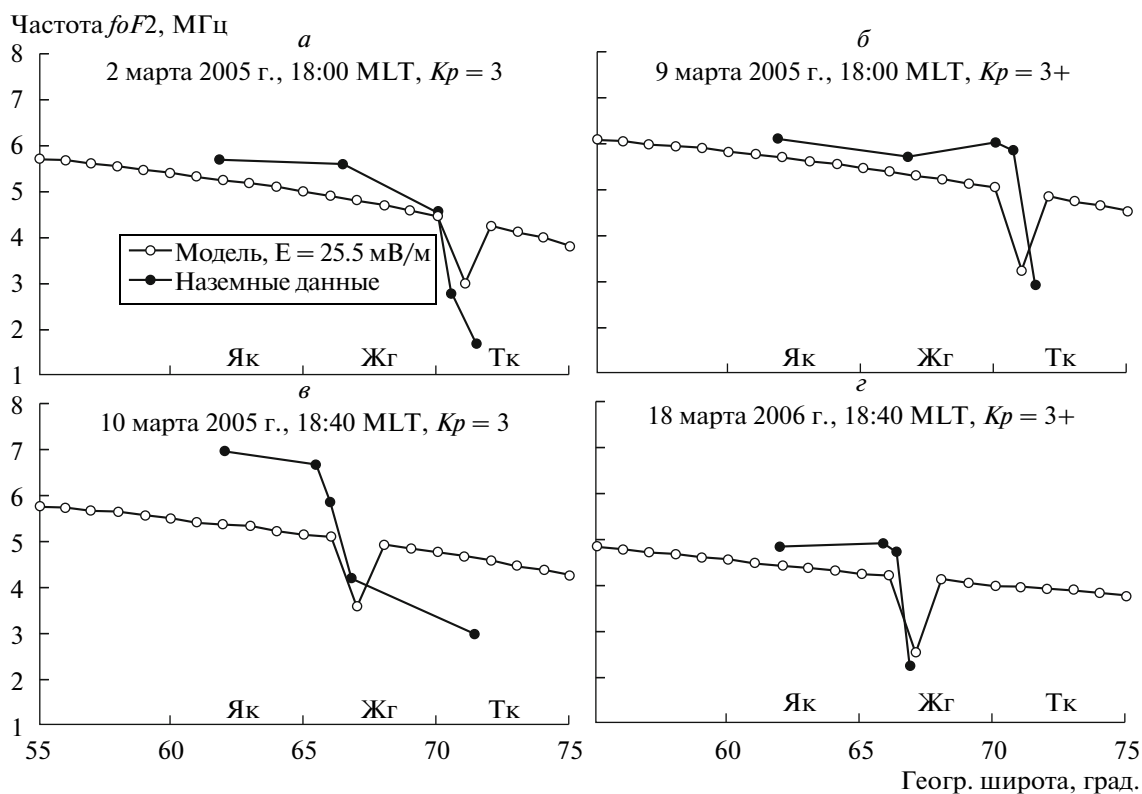


Рис. 5. Случаи сопоставления модельных расчетов с экспериментальными данными наземных станций ионосферного зондирования за конкретные дни.

оси ординат — частоты $foF2$ в МГц. Расположения станций Якутской цепочки на оси абсцисс обозначены как Як, ЖГ и Тк, соответственно для ионозондов Якутска, Жиганска и Тикси.

Из рисунка видно, что между рассчитанными по формуле частотами модельных значений Ne и ионосферными плазменными частотами наземных станций имеется вполне удовлетворительное согласие.

3. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В последнее время появились работы по морфологии и динамике субавроральных поляризационных потоков, обозначаемых как SAPS (SubAuroral Polarization Stream) [Foster and Burke, 2002; Foster and Vo, 2002; Huang and Foster, 2007; Wang et al., 2008]. SAPS — это сильное электрическое поле полярного направления или западный поток плазмы в области экваториальнее границы авроральных электронных высыпаний в вечерне-полуночном секторе во время усиления геомагнитных возмущений. Ширина полосы SAPS составляет $\sim 5^\circ$ и больше, не имеет резких экваториальных и полярных границ, а средние пики скоростей в полосе >900 м/с. В приведенных работах не делается большого различия между SAPS и поляризационным джетом, который намного уже по ширине и имеет резкую экваториальную границу в Ne . Считается, что в отсутствие

широкой полосы западного дрейфа ПД и есть SAPS, т.е. частный случай SAPS. Отметим также и тот факт, что поляризационный джет регистрируется не в каждую суббурю или в каждом случае глубокой инжекции частиц. Это указывает на то, что механизм формирования ПД/SAPS все еще полностью не ясен и требует дальнейших экспериментальных и модельных исследований [Galperin, 2002; Huang and Foster, 2007].

Наши расчеты на трехмерной модели высокоширотной ионосферы с включением локальных электрических полей показали:

- наличие сильного локального электрического поля на субавроральных широтах существенно влияет на структуру ионосферы;

- на месте включения электрического поля формируется узкий провал в широтном ходе электронной концентрации максимума $F2$ -слоя за счет выноса ионосферной плазмы с вечерней стороны на дневную, который в свою очередь, обусловлен низкой проводимостью в области главного ионосферного провала;

- узкий провал более выражен в ранние вечерние часы, когда фоновая концентрация электронов еще высока и менее выражен при низких уровнях фона в предполуночные часы;

— сравнение результатов расчетов и экспериментальных данных показало хорошее их согласие, что позволяет говорить о поляризационном джете как об основном механизме формирования узких провалов ионизации в субавроуральной ионосфере.

Настоящая работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 09-05-98501) и Программой Президиума РАН № 16 часть 3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гальперин Ю.И., Пономарев В.Н., Зосимова А.Г. Прямые измерения скорости дрейфа ионов в верхней ионосфере во время магнитной бури // Космич. исслед. Т. 11. № 2. С. 273–296. 1973.
- Голиков И.А., Мамруков А.П., Филиппов Л.Д. Проявления главного ионосферного провала в дневное время // Физические процессы в субавроуральной ионосфере. Якутск: ЯГУ. С. 38–45. 1985.
- Голиков И.А., Колесник А.Г., Чернышев В.И., Попов В.И. Математическая модель области F2 высокоширотной ионосферы с учетом теплового режима // Вестник ЯГУ. Т. 2. № 3. С. 61–69. 2005.
- Колесник А.Г., Голиков И.А. Трехмерная модель высокоширотной области F с учетом несовпадения географических и геомагнитных координат // Геомагнетизм и аэронаомия. Т. 22. № 5. С. 725–731. 1982.
- Колесник А.Г., Голиков А.Г., Чернышев В.И. Математические модели ионосферы. Томск: МГП Раско. 240 с. 1993.
- Филиппов В.М., Решетников Д.Д., Соловьев В.С., Степанов А.Е., Андреев Р.П. Наблюдения методом D1 полосы субавроурального ионного дрейфа // Комплексные исследования полярной ионосферы. Апатиты: КФ АН СССР. С. 45–48. 1987.
- Филиппов В.М., Решетников Д.Д., Халипов В.Л., Степанов А.Е., Соловьев В.С., Мулярчик Т.М. Комплексные измерения узких провалов ионизации в области F наземными и спутниковыми методами // Космич. исслед. Т. 27. Вып. 4. С. 568–584. 1989.
- Халипов В.Л., Гальперин Ю.И., Степанов А.Е., Шестакова Л.В. Формирование поляризационного джета в ходе взрывной фазы суббури: результаты наземных измерений // Космич. исслед. Т. 39. Вып. 3. С. 244–253. 2001.
- Чернышев В.К., Заболоцкий М.С. Прогностическая модель высокоширотной ионосферы // Геомагнетизм и аэронаомия. Т. 34. № 3. С. 67–71. 1994.
- Шульгина Н.В. Спорадические образования в F-области // Авроральные явления 70. Апатиты: изд-во КФ АН СССР. С. 44–46. 1974.
- Anderson P.C., Hanson W.B., Heelis R.A., Craven J.D., Baker D.N., Frank L.A. A proposed production model of rapid subauroral ion drifts and their relationship to substorm evolution // J. Geophys. Res. V. 98. P. 6069–6078. 1993.
- Anderson P.C., Carpenter D.L., Tsuruda K., Mukai T., Rich F.J. Multisatellite observations of rapid subauroral ion drifts (SAID) // J. Geophys. Res. V. 106. № A12. P. 29585–29599. 2001.
- Bilitza D., Reinisch B. International Reference Ionosphere 2007: Improvements and new parameters // J. Adv. Space Res. V. 42. № 4. P. 599–609. 2008.
- Foster J.C., Buonsanto M.J., Menditto M., Nottingham D., Rich F.J., Denning W. Coordinated stable auroral red arc observations: Relationship to plasma convection // J. Geophys. Res. V. 99. P. 11429–11439. 1994.
- Foster J.C., Vo H.B. Average characteristics and activity dependence of the subauroral polarization stream // J. Geophys. Res. V. 107. (A12). P. 1475, doi:10.1029/2002JA009409, 2002.
- Foster J., Burke W. SAPS: A new categorization for subauroral electric fields // EOS Trans. AGU. V. 83. P. 293–294. 2002.
- Galperin Yu.I., Ponomarev V.N., Zosimova A.G. Plasma convection in the polar ionosphere // Ann. Geophysicae. V. 30. P. 1–7. 1974.
- Galperin Yu.I., Khalipov V.L., Filippov V.M. Signature of rapid subauroral ion drifts in the highlatitude ionosphere structure // Ann. Geophysicae. V. 4. A2. P. 145–154. 1986.
- Galperin Yu.I. Polarization Jet: characteristics and a model // Ann. Geophysicae. V. 20. P. 391–404. 2002.
- Huang C.S., Foster J.C. Correlation of the subauroral polarization streams (SAPS) with the Dst-index during severe magnetic storms // J. Geophys. Res. V. 112. A11302. doi: 10.1029/2007JA012584, 2007.
- Karlsson T., Marklund G.T., Blomberg L.G., Malkki A. Subauroral electric fields observed by the Freja satellite: A statistical study // J. Geophys. Res., V. 103. P. 4327–4341. 1998.
- Khalipov V.L., Galperin Yu.I., Stepanov A.E., Bondar' E.D. Formation of polarization jet during injection of ions into the inner magnetosphere // Adv. Space Res. V. 31. № 5. P. 1303–1308. 2003.
- Smiddy M., Kelley M.C., Burke W.J., Rich R., Sagalyn R., Shuman B., Hays R., Lai S. Intense poleward directed electric fields near the ionospheric projection of plasma-pause // Geophys. Res. Lett. V. 4. P. 543–546. 1977.
- Southwood D.J., Wolf R.A. An assessment of the role of precipitation in magnetospheric convection // J. Geophys. Res. V. 83. P. 5227–5232. 1978.
- Spiro R.W., Heelis R.A., Hanson W.B. Rapid subauroral ion drifts observed by Atmospheric Explorer C // Geophys. Res. Lett. V. 6. P. 657. 1979.
- Wang H., Ridley A.J., Luhr H., Liemohn M.W., Shu Y. Ma. Statistical study of the subauroral polarization stream: Its dependence on the cross-polar cap potential and subauroral conductance // J. Geophys. Res. V. 113. A12311. doi:10.1029/2008JA013529, 2008.