

005001333

На правах рукописи

Бондарь

БОНДАРЬ Елена Дмитриевна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ДЖЕТА
В СУБАВРОРАЛЬНОЙ ИОНОСФЕРЕ ЕВРАЗИИ**

25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

10 Июн 2011

Якутск – 2011

Работа выполнена в Институте космофизических исследований и астрономии им. Ю.Г.Шафера Сибирского отделения Российской академии наук

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор Голиков Иннокентий Алексеевич (Северо-Восточный федеральный университет им. М.К.Аммосова, г. Якутск)

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор Ромащенко Юрий Александрович (Северо-Восточный федеральный университет им. М.К.Аммосова, г. Якутск)

кандидат физико-математических наук Тащилин Анатолий Васильевич (Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск)

Ведущая организация: Томский государственный университет

Защита диссертации состоится 30 ноября 2011 г. в 11 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета К 003.023.01 в Институте космофизических исследований и астрономии им. Ю.Г.Шафера СО РАН по адресу: 677980, г.Якутск, проспект Ленина, 31, ИКФИА им. Ю.Г.Шафера СО РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИКФИА им. Ю.Г.Шафера СО РАН.

Автореферат разослан "27" октября 2011 г.

И.о. ученого секретаря диссертационного совета,
доктор физико-математических наук



А.А.Иванов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В настоящей диссертационной работе представлены результаты исследований поляризационного джета по данным наземных измерений на меридиональной и долготной цепочках ионосферных станций с привлечением спутниковых измерений. Также приведены модельные расчёты в рамках трёхмерной модели высокоширотной ионосферы, модернизированной с учётом включения локального электрического поля магнитосферного происхождения.

Актуальность исследования

Физические явления, происходящие в ионосфере субавроральных широт, давно привлекают внимание учёных. К наиболее интересным явлениям этой зоны можно отнести появление узких струй быстрых субавроральных ионных дрейфов к западу вблизи проекции плазмопаузы на высотах области F ионосферы. Это явление впервые было обнаружено Ю.И. Гальпериным [1] по данным спутника «Космос-184» и названо им поляризационным джетом.

Ввиду условий вмороженности плазмы такая узкая полоса дрейфа на высотах области F отождествляется с регистрируемым спутниками развитием локального, направленного к полюсу электрического поля на экваториальной границе зоны конвекции. Скорость плазмы в полосе поляризационного джета достигает на высотах области F сверхзвуковых значений – до 4-5 км/с, что соответствует величине электрического поля до долей Вольта на метр.

Существование поляризационного джета приводит к целому ряду резких структурных изменений в ионосфере, таких как образование узкого провала в широтном ходе электронной концентрации, нагрев плазмы, появление плазменных неоднородностей, которые оказывают влияние на условия распространения радиоволн, тем самым отражая изменения космической погоды.

Несмотря на то, что экспериментальные и теоретические исследования поляризационного джета ведутся уже несколько десятилетий, природа его до

конца не выяснена, и исследование этого явления до сих пор остаётся актуальной задачей физики ионосферы.

Основной целью диссертации является экспериментальное и теоретическое исследование характеристик поляризационного джета. В связи с этим ставились следующие задачи:

1. Исследование пространственно-временной динамики поляризационного джета методом вертикального зондирования ионосферы по данным сети ионосферных станций.

2. Изучение процесса формирования поляризационного джета и его связи с началом суббури по наземным данным.

3. Исследование связи инъекции энергичных ионов с возникновением поляризационного джета по спутниковым данным и наземным измерениям.

4. Теоретическое исследование влияния быстрых субавроральных ионных дрейфов на структуру субавроральной ионосферы при возникновении сильных локальных электрических полей магнитосферного происхождения.

Научная новизна

1. На основе анализа данных наземных измерений поляризационного джета на пространственно-разнесенных по долготе ионосферных станциях впервые получена оценка скорости движения фронта поляризационного джета.

2. Впервые показано, что в околополуденном секторе MLT формирование поляризационного джета происходит на взрывной фазе суббури.

3. Экспериментально подтвержден физический механизм формирования поляризационного джета за счет инъекции энергичных ионов во внутреннюю магнитосферу.

4. На основе анализа экспериментальных данных и сравнения с модельными расчётами показано влияние электрического поля поляризационного джета на структуру и динамику F -слоя ионосферы.

Научная и практическая ценность

Полученные в работе результаты позволили выявить связь между появлением поляризационного джета и временем начала суббури, что может быть использовано для исследования магнитосферно-ионосферного взаимодействия, диагностики и прогноза взаимосвязанных физических процессов, определяющих космическую погоду.

Личный вклад автора

Все основные результаты, представленные в диссертации, получены при личном участии автора. Автор принимал непосредственное участие в обработке и анализе ионосферных и спутниковых данных, модельных расчётах, самостоятельно подобрал и проанализировал необходимые материалы ионосферных наземных и спутниковых измерений. Автору в равной степени с соавторами принадлежат все полученные научные результаты и выводы.

Защищаемые положения

1. Экспериментально показано, что формирование поляризационного джета происходит вблизи местной магнитной полуночи во время начала суббуревых возмущений.

2. По данным синхронных наземных радиофизических измерений и регистрации со спутника энергичных ионов с энергиями 20-50 кэВ в магнитосфере показано, что поляризационный джет возникает в области экваториальной границы инжекции ионов во внутреннюю магнитосферу.

3. Теоретически показано, что возникновение поляризационного джета сопровождается существенным изменением структуры и динамики субавроральной ионосферы – образованием узкого провала в широтном ходе электронной концентрации за счет выноса ионосферной плазмы с вечерней стороны на дневную.

Достоверность результатов, представленных в диссертации, определяется использованием физически обоснованных методов и

представительной статистикой наблюдений, а также использованием современных методов моделирования. Полученные экспериментальные материалы подтверждаются результатами, опубликованными другими авторами.

Апробация работы

Результаты, вошедшие в диссертацию, обсуждались на семинарах ИКФИА СО РАН, ИСЗФ СО РАН, СФТИ ТГУ, кафедры радиофизики и электроники ФГАО ВПО СВФУ, были доложены на XXIV и XXV ежегодном Апатитском семинаре «Физика авроральных явлений» (Апатиты, 2001; 2002), Международной «Байкальской школе по фундаментальной физике» (Иркутск, 2002; 2003; 2005), аспирантских чтениях, форумах и конференциях научной молодёжи Якутии (Якутск, 2002; 2004; 2007; 2009; 2010), Международной конференции «Солнечно-земная физика» (Иркутск, 2004), Всероссийской конференции «Современные проблемы космической физики» (Якутск, 2007), Международной школе молодых учёных «Физика окружающей среды» (Томск, 2008; 2010; 2011), Лаврентьевских чтениях (Якутск, 2008), XI Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов (Нерюнгри, 2010), на XXIX и XXX Международной конференции, посвящённой явлениям в ионизованных газах «International Conference on Phenomena in Ionized Gases» (Канкун, Мексика, 2009; Белфаст, Ирландия, 2011).

Различные аспекты работы, положенные в основу диссертации, прошли экспертизу и выполнялись по программам фундаментальных исследований ИКФИА СО РАН, а также были поддержаны грантами РФФИ № 02-02-26525-зм, 03-05-96081-p2003Арктика_a, 09-02-09406-моб_з, 09-05-98501-p_восток_a, 09-05-98546-p_восток_a. Часть исследований была выполнена в рамках конкурса СО РАН по организации и финансированию фундаментальных исследований молодых учёных Учреждения Российской академии наук Сибирского отделения РАН по приоритетным направлениям науки.

Публикации

Основной материал диссертации опубликован в 19 работах, из них 4 – в рецензируемых журналах из перечня ВАК.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и приложения, содержит 127 страниц машинописного текста, включая приложение, 42 рисунка, 3 таблицы, библиографию из 119 наименований. Полный список работ автора приведён в основном тексте диссертации.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, поставлена задача и дана краткая аннотация содержания работы по главам, описаны новизна, достоверность и практическая ценность полученных результатов, сформулированы защищаемые положения.

В первой главе представлен краткий обзор литературы по теме диссертации. Рассмотрены характеристики поляризационного джета по данным спутниковых и наземных наблюдений, а также описаны основные механизмы его возникновения. Отмечен ряд нерешённых вопросов, касающихся связи возникновения поляризационного джета со временем начала суббури, его долготной протяжённости, механизмов формирования.

Во второй главе даны описания аппаратуры и методики исследований. Приведён «автограф» поляризационного джета на аналоговых и цифровых ионограммах наземного зондирования ионосферы. Показано, что развитие поляризационного джета на высотах ионосферы вызывает появление дополнительных следов $F3s$ отражений, значительное уменьшение критических частот и подъём $F2$ -слоя и хорошо определяется по измерениям ионозондов. Даны примеры сопоставления наземных ионосферных данных и спутниковых измерений поляризационного джета.

В третьей главе проанализированы характеристики поляризационного джета по измерениям на разнесённых по долготе ионосферных станциях и

спутниковым данным. В первом разделе рассмотрены сезонные особенности поляризационного джета, зависимость его появления от геомагнитных условий, исследована взаимосвязь между временем начала суббури и появлением поляризационного джета над разнесёнными по долготе ионосферными станциями Якутск и Подкаменная Тунгуска, где за 1988–1992 гг. нами было найдено 176 случаев одновременной регистрации этого явления. Моменты регистрации поляризационного джета на ионограммах сопоставлялись с моментами суббуревых возмущений с уровнем $AE \sim 500$ нТ и более. При этом отбирались события, когда в предшествующий появлению поляризационного джета интервал времени длительностью не менее, чем 5 ч, регистрировалось не более одной суббуревой активизации с $AE > 500$ нТл.

На рис. 1 показана зависимость времени появления поляризационного джета на станциях Якутск и Подкаменная Тунгуска от времени начала суббури. События были отобраны с условием, что время задержки появления поляризационного джета над станцией наблюдения не превышает 3-х часов после начала суббури. Видно, что коэффициент корреляции между началом суббури и появлением поляризационного джета для Якутска составляет 0.95, а для Подкаменной Тунгуски – 0.91. Штриховая линия на этих рисунках отмечает нулевую задержку между рассматриваемыми явлениями.

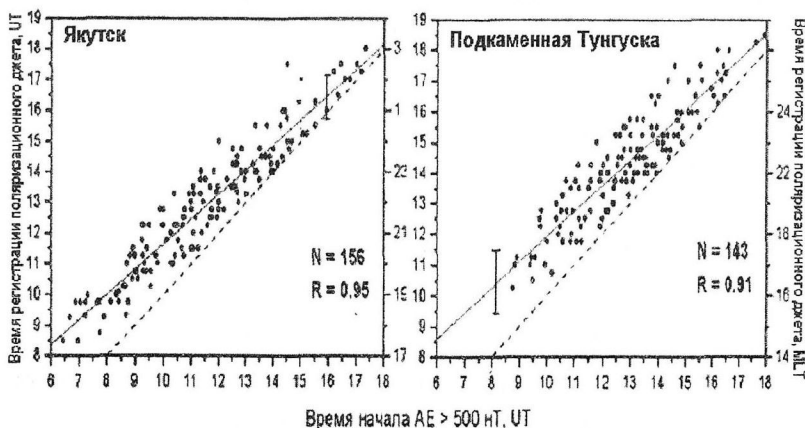


Рис. 1. Зависимость времени появления поляризационного джета на станциях Якутск и Подкаменная Тунгуска от времени начала суббури ($AE \geq 500$ нТ), (штриховая линия показывает отсутствие задержки)

Сравнение хода линейной аппроксимации массива точек с линией нулевой задержки показывает возрастание средней задержки регистрации поляризационного джета в более ранние часы местного времени. В среднем время запаздывания относительно момента начала суббури составляет около двух часов в раннем вечернем секторе и уменьшается до получаса вблизи полуночи. Эта величина согласуется с результатом, полученным по измерениям со спутника DE-2 [2]. Однако, как видно из приведенных результатов наземных измерений, некоторая часть событий, относящихся к околополуночному сектору, происходит одновременно или с минимальным (≤ 10 мин) запаздыванием относительно начала суббури, что соответствует появлению поляризационного джета в ходе взрывной фазы суббури. Этот результат противоречит общепринятой точке зрения на формирование поляризационного джета на фазе восстановления суббури [3].

Второй раздел третьей главы посвящён проверке механизма формирования поляризационного джета при суббуревой инжекции энергичных ионов во внутреннюю магнитосферу. Приведены результаты одновременных измерений инжекции энергичных ионов со спутника AMPTE/CSE и регистрации поляризационного джета по ионосферным данным наземных станций вертикального зондирования (Якутск, Магадан, Салехард, Подкаменная Тунгуска, Архангельск) за 1984–1988 гг.

Рассмотрен случай одновременного наблюдения поляризационного джета на ст. Подкаменная Тунгуска и регистрации инжекции энергичных ионов со спутника AMPTE/CSE в раннем вечернем секторе. 25 сентября 1987 г. спутник зарегистрировал экваториальную границу инжекции энергичных ионов в 15:00 UT (23.2 LT) на $L=2.9$, т.е. спустя 30 минут после начавшейся в 14:30 UT суббури. Наиболее близко расположенной станцией в этот момент являлась Подкаменная Тунгуска, на которой начало поляризационного джета было зарегистрировано в 15:30 UT (LT=21:30). Мы полагаем, что эта 30-минутная разница во времени регистрации поляризационного джета связана с задержкой прибытия энергичных ионов в поле зрения ионосферных измерений. Нами было найдено 19 подобных случаев, когда инжекция энергичных ионов во внутреннюю магнитосферу сопровождалась

формированием поляризационного джета и это формирование имело место около экваториальной границы области инжекции.

На основе полученных данных можно сделать вывод, что формирование поляризационного джета сопровождается инжекцией энергичных ионов. Наши данные также показывают, что в вечернем секторе популяция ионов чаще наблюдается как размытые по энергии «носые структуры», в окологлобальном же секторе вблизи области инжекции чаще наблюдается общая резкая граница для ионов всех энергий.

Для определения скорости смещения на запад фронта поляризационного джета мы проанализировали данные долготной цепочки наземных ионосферных станций. Из имеющегося массива данных были выбраны случаи изолированных суббурь в секторе 09:00–12:00 UT. Таких случаев было найдено 7. Рассмотрим день 19 сентября 1985 года, когда поляризационный джет наблюдался последовательно на трёх станциях – Магадан ($\Lambda=218,2^\circ$) в 10:45 UT, затем Подкаменная Тунгуска ($\Lambda=162,5^\circ$) в 11:45 UT, и Архангельск ($\Lambda=117,8^\circ$) в 12:30 UT (LT=15:30). Зная разность по долготе между местоположениями станций, мы рассчитали время смещения фронта поляризационного джета, составившее 4 часа MLT за час. Эта скорость согласуется со скоростью, характерной для скорости азимутального дрейфа ионов с энергиями 20-40 кэВ на $L=3$. Расчёт скорости азимутального дрейфа ионов приведён в этой же главе.

Таким образом, временные задержки формирования поляризационного джета по наземным и спутниковым данным согласуются с временем, необходимым для дрейфа ионов с энергиями ~ 30 кэВ после начала суббури до станции наблюдения. Следовательно можно сделать вывод, что для инжектированных ионов, наблюдаемых спутником AMPTE/CCE, скорость азимутального дрейфа близка к скорости источника, ответственного за формирование поляризационного джета.

В четвёртой главе проведены расчёты в рамках трёхмерной модели высокоширотной ионосферы, построенной на основе системы уравнений гидродинамики в переменных Эйлера с учетом теплового режима и

несовпадения географических и геомагнитных полюсов [4]. В первой части главы дано описание модели.

Во второй части главы для исследования влияния поляризаационного джета на структуру субавроральной ионосферы приведены модельные расчёты, в которых начальные условия были приближены к реально наблюдаемым геофизическим условиям при возникновении поляризаационного джета: долготный интервал расчетов – от 0° до 270° ; широтный интервал – от 40° до 90° географической широты; геомагнитная активность $K_p=3-5$; сезон – равноденствие. Дополнительно задавались следующие параметры: ширина локального электрического поля магнитосферного происхождения $1-2^\circ$, его значения менялись от 25,5 до 76,5 мВ/м, что соответствует скоростям дрейфа от 500 до 1500 м/с.

На рис. 2 в географической системе координат приведены картины изолиний равной электронной концентрации (N_e , в ед. 10^4 см^{-3}). Спокойный период равноденствия без включения дополнительного локального электрического поля показан на рис. 2 а, а последующие картины этого же периода (б, в, г) показывают изолинии при включении локального электрического поля величиной 25.5, 51 и 76.5 мВ/м, что соответствует скоростям западного дрейфа 500, 1000 и 1500 м/с.

Положение поляризаационного джета задавалось на широтах станций Тикси, Жиганск и Якутск, при этом увеличивались значения геомагнитной возмущенности ($A_p = 15, 27$ и 48). Модельные расчеты с включением дополнительного локального электрического поля показали существенно изменившуюся структуру субавроральной ионосферы, – в области главного ионосферного провала наблюдается узкий и глубокий провал. Формирование такого субпровала в работах [1, 5] объясняется выносом ионосферной плазмы на дневную сторону при сильных электрических полях и изменением скоростей фотохимических реакций между ионами и нейтральными частицами.

В рамках модели были построены широтные профили электронной концентрации N_e для различных моментов времени и значений скоростей. Замечено, что узкие провалы в электронной концентрации более выражены

при высоких фоновых значениях N_e , т.е. в ранние вечерние часы, и менее выражены при низких уровнях фона в предполуночные часы.

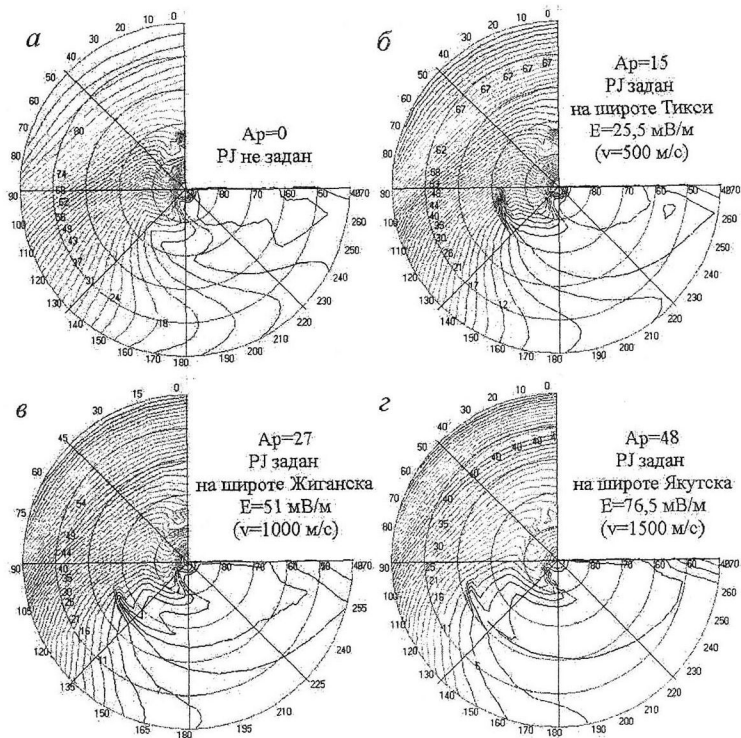


Рис.2. Картины изолиний равной электронной концентрации N_e (в ед. 10^4 см $^{-3}$):

а) – спокойный период равенствия без включения дополнительного локального электрического поля; б, в, г) – изолинии при включении локального электрического поля E величиной 25,5, 51 и 76,5 мВ/м (скоростях v западного дрейфа 500, 1000 и 1500 м/с соответственно), поляризационный джет обозначен как PJ

Был произведён пересчёт модельных значений электронной концентрации N_e в критическую частоту f_oF2 . Сравнение результатов расчётов и экспериментальных данных (рис. 3) показывает хорошее согласие, что позволяет говорить о поляризационном джете как об основном механизме формирования узких провалов ионизации в субавроральной ионосфере.

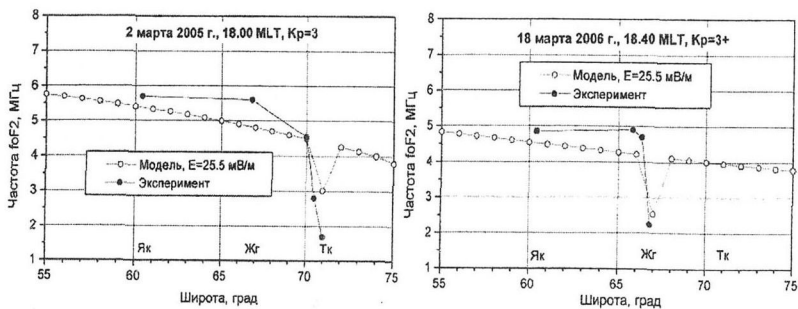


Рис. 3. Сопоставление модельных расчетов с экспериментальными данными

В третьей части 4 главы для объяснения сезонных особенностей влияния поляризационного джета на структуру субавроральной ионосферы проведены модельные расчёты на трёхмерной модели высокоширотной ионосферы с учётом поляризационного джета и UT-контроля для трёх сезонов – равноденствия, летнего и зимнего периодов (при склонении Солнца $\delta = 0$ – равноденствие, 23° – лето, -23° – зима) на основе теории «полной тени», то есть пренебрегая слабыми остаточными дрейфами и ветром нейтралов в провале. При этом задавались следующие условия: геомагнитная активность $K_p=3$; скорости поляризационного джета изменялись от 500 до 3000 м/с; ширина поляризационного джета – 2° ; положение поляризационного джета за областью магнитосферной конвекции; интервал местного времени от 12.00 до 24.00 часов.

Сопоставление модельных расчетов с экспериментальными данными показало, что сезонные особенности проявления поляризационного джета, как по $F3s$ – дополнительным отражениям на ионограммах, так и по рассчитанным узким провалам ионизации на высотах F -области субавроральной ионосферы хорошо согласуются. Существенные изменения в пространственно-временном распределении электронной концентрации происходят в весенне-осенний период; в летний – во время усиления магнитосферного электрического поля; в зимних условиях изменения за счет быстрого субаврорального дрейфа минимальны.

В заключении приведены основные результаты работы:

1. На основе анализа данных разнесённых по долготе станций вертикального зондирования ионосферы Якутск и Подкаменная Тунгуска за 1989-1992 годы показано, что формирование поляризационного джета может происходить вблизи местной магнитной полуночи во время начала суббуриных возмущений.
2. По данным синхронных измерений поляризационного джета на сети ионосферных станций в Евразийском регионе и наблюдений энергичных ионов с энергиями 20-50 кэВ со спутника AMPTE-CSE подтверждена связь между инъекцией энергичных ионов во внутреннюю магнитосферу и формированием поляризационного джета. Показано, что поляризационный джет возникает в области экваториальной границы инъекции ионов во внутреннюю магнитосферу.
3. Показано, что после начала суббуриной вспышки источник, ответственный за формирование поляризационного джета, перемещается с востока на запад со скоростью около 4 часов MLT за час.
4. Расчеты на трехмерной модели высокоширотной ионосферы с включением локального электрического поля показывают существенное изменение структуры и динамики ионосферы – возникновение узкого провала в широтном ходе электронной концентрации за счет выноса ионосферной плазмы с вечерней стороны на дневную. Узкий провал более выражен в ранние вечерние часы и менее выражен в предполуночные часы.

Основные публикации автора по теме диссертации

1. Khalipov, V.L. Polarization jet formation during a substorm breake up phase: results of ground- based measurements / V.L.Khalipov, Y.I.Galperin, A.E.Stepanov, L.V.Shestakova, E.D.Bondar' // Physics of Auroral Phenomena, Proc. XXIV Annual Seminar, Apatity, 27 Feb.-02 Mar. – 2001. – P. 17–20.
2. Khalipov, V.L. Formation of Polarization Jet during an injection of ions into the Inner Magnetosphere / V.L.Khalipov, Y.I.Galperin, A.E.Stepanov, E.D.Bondar' // Adv. Space Res. – 2003. – V. 31. – № 5. – P. 1303-1308.

3. Бондарь, Е.Д. Модель положения экваториальной границы инжекции энергичных ионов при различных уровнях геомагнитной возмущенности / Е.Д.Бондарь, В.Л.Халипов, А.Е.Степанов // Гелио- и геофизические исследования : Сб. трудов БШФФ-2002, Иркутск, 16–21 сент. 2002 г. – Иркутск: Изд-во ИСЗФ СО РАН, 2003. – С. 97–100.
4. Khalipov, V.L. Formation of Polarization Jet during a injection of ions into the Inner Magnetosphere / V.L.Khalipov, A.E.Stepanov, E.D.Bondar' // Physics of Auroral Phenomena, Proc. XXV Annual Seminar. Apatity, 2002. – P. 43–46.
5. Khalipov, V.L. SAR-arc characteristics in the region of ring current dissipation and during polarization jet development / V.L.Khalipov, V.F.Gubsky, V.V.Afonin, E.D.Bondar', A.E.Stepanov // Physics of Auroral Phenomena, Proc. XXVII Annual Seminar, Apatity, 2–5 March 2004 г. – Apatity: 2004. – P. 9–12.
6. Афраймович, Э.Л. Главный ионосферный провал по данным GPS и ионосферной станции Якутск 26 декабря 2002 года / Э.Л.Афраймович, О.М.Пирог, Е.Д.Бондарь // Астрофизика и физика околоземного космического пространства : Сб. трудов БШФФ-2005, Иркутск, 12–17 сент. 2005 г. – Иркутск: Изд-во ИСЗФ СО РАН, 2005 – С. 54–56.
7. Афраймович, Э.Л. Исследование главного ионосферного провала по данным GPS и ионосферных станций в районе Якутска / Э.Л.Афраймович, О.С.Лесюта, Н.П.Перевалова, О.М.Пирог, В.Ф.Смирнов, Г.К.Зикрач, Е.Д.Бондарь // Геомагнетизм и аэрономия – 2005. – Т. 45. – №2. – С. 215–220.
8. Бондарь, Е.Д. Характеристики поляризованного джета по измерениям на субавроральных станциях Якутск и Подкаменная Тунгуска / Е.Д.Бондарь, В.Л.Халипов, А.Е.Степанов // Солнечно-земная физика. – 2005. – № 8. – С. 143–145.
9. Бондарь, Е.Д. Характеристики быстрых ионных дрейфов по данным ионосферных станций на субавроральных широтах / Е.Д. Бондарь, В.Л. Халипов, А.Е. Степанов // Солнечно-земная физика. – 2005. – № 8. – С. 161–164.

10. Степанов, А.Е. Срывы критических частот слоя F2 как граница крупномасштабной конвекции плазмы / А.Е.Степанов, В.Л.Халипов, Е.Д.Бондарь, М.С.Заболоцкий // Современные проблемы космической физики: Сб. докладов Всероссийской конференции, посвященной 70-летию академика Г.Ф.Крымского, Якутск, 26–28 нояб. 2007 г. – Якутск: ИКФИА СО РАН, 2008. – С. 165–168.
11. Голиков, И.А. Исследование быстрых субавроральных ионосферных дрейфов по данным наземных ионосферных измерений и модельных расчётов / И.А.Голиков, А.Е.Степанов, Е.Д.Бондарь, В.И.Попов, В.Л.Халипов // Физика окружающей среды: Мат. VII межд. школы молодых ученых, Томск, 22– 29 июня 2008 г. – Томск: 2008. – С. 30–33.
12. Степанов, А.Е. Сопоставление характеристик поляризованного джета на разнесенных станциях Якутск – Подкаменная Тунгуска / А.Е. Степанов, В.Л. Халипов, Е.Д. Бондарь // Космические исследования – 2008. – Т. 46. – № 2. – С. 116–121.
13. Bondar, Ye. The Polarization Jet influence on the subauroral ionospheric structure / Ye. Bondar, I. Golikov, V. Khalipov, A. Koryakin, V. Popov, T. Solovyev and A. Stepanov // Conference Proceedings of the 29th International Conference on Phenomena in Ionized Gases (ICPIG 2009) in Cancun, Mexico, July 12-17. – Mexico, 2009. – V. 1. – P.365–368.
14. Голиков, И.А. Исследование влияния быстрых субавроральных дрейфов на структуру субавроральной ионосферы / И.А.Голиков, А.Е.Степанов, Е.Д.Бондарь, В.И.Попов, Т.Н.Соловьёв // Мат. Конф. научной молодёжи Эрэл-2009, г. Якутск, 1–3 декабря 2009 г. – Якутск: 2009. – С. 11–14.
15. Степанов, А.Е. Моделирование эффекта влияния локальных электрических полей магнитосферного происхождения на структуру субавроральной ионосферы / А.Е.Степанов, И.А.Голиков, Е.Д.Бондарь, В.И.Попов, В.Л.Халипов // Физика окружающей среды : Мат. VIII Межд. школы молодых ученых, г. Томск, 22– 27 июня 2010 г. – Томск: ТМЛ-пресс 2010. – С. 30–33.

16. Бондарь, Е.Д. Исследование эффектов влияния поляризационного джета на структуру субавроральной ионосферы с использованием трёхмерной модели высокоширотной ионосферы / Е.Д. Бондарь, И.А. Голиков, В.И. Попов, А.Е. Степанов, В.Л. Халипов // Материалы XI Всероссийской научно-практич. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов, Нерюнгри, 2–3 апр. 2010 г. – Нерюнгри: Технический институт ЯГУ, 2010. – С. 204–207.
17. Бондарь, Е.Д. Исследование сезонных особенностей влияния поляризационного джета на крупномасштабную структуру субавроральной ионосферы / Е.Д.Бондарь, И.А.Голиков, В.И.Попов, А.А.Решетников, А.Е.Степанов // Мат. Всероссийской конференции с междунар. участием "Физика окружающей среды", г. Томск, 27 июня – 1 июля 2011 г. – Томск: 2011. – С. 60–63.
18. Степанов, А.Е. Структурные особенности субавроральной ионосферы при возникновении поляризационного джета / А.Е.Степанов, И.А.Голиков, В.И.Попов, Е.Д.Бондарь, В.Л.Халипов // Геомagnetизм и аэрономия – 2011. – Т.51. – №5. – С.643–649.
19. Golikov, I. The modelling of the seasonal features of the Polarization Jet appearance / Golikov, I., A.Stepanov, V.Popov, A.Reshetnikov, Ye.Bondar, A.Koryakin, T.Solovyev // Conference Proceedings of the 30th International Conference on Phenomena in Ionized Gases in Belfast, Northern Ireland, August 28th – September 2nd 2011. http://mpserver.pst.qub.ac.uk/sites/icpig2011/103_C7_Reshetnikov.pdf.

Цитированная литература:

1. Гальперин, Ю. И. Прямые измерения скорости дрейфа ионов в верхней ионосфере во время магнитной бури / Ю.И. Гальперин, В.Н. Пономарев, А.Г. Зосимова // Космические исследования – 1973. – Т. 11. – № 2. – С. 284–296.
2. Anderson, P.C. A proposed production model of rapid subauroral ion drifts and their relationship to substorm evolution / P.C. Anderson, W.B. Hanson,

- R.A. Heelis, J.D. Craven, D.N. Baker, L.A. Frank // *J. Geophys. Res.* – 1993. – V. 98. – № A4. – P. 6069–6078.
3. Spiro, R.W. Rapid subauroral ion drifts observed by Atmospheric Explorer C / R.W. Spiro, R.A. Heelis, W.B. Hanson // *Geophys. Res. Lett.* – 1979. – V. 6. – № 8. – P. 657–660.
 4. Колесник, А.Г. Трехмерная модель высокоширотной области F с учетом несовпадения географических и геомагнитных координат / А.Г. Колесник, И.А. Голиков // *Геомагнетизм и аэронавигация* – 1982. – Т. 22. – № 5 – С. 725–731.
 5. Филиппов, В.М. Комплексные измерения узких провалов ионизации в области F наземными и спутниковыми методами / В.М. Филиппов, Д.Д. Решетников, В.Л. Халипов, А.Е. Степанов, В.С. Соловьев, Т.М. Мулярчик // *Космические исследования* – 1989. – Т. 27. – № 4. – С. 568–584.

Автор благодарит своего научного руководителя доктора физико-математических наук, профессора Голикова Иннокентия Алексеевича. Автор очень признателен Халипову Виктору Лаврентьевичу, Степанову Александру Егоровичу, Баишеву Дмитрию Гаврильевичу, Барковой Елене Сергеевне, Зикрач Энгелине Константиновне и Афраймовичу Эдуарду Леонтьевичу за помощь в работе над диссертацией, ценные замечания и моральную поддержку.

Подписано в печать 25.10.2011. Формат 60x 84/16.
Гарнитура «Таймс». Печать офсетная.
Печ. л. 1,2. Уч.-изд. л. 1,5. Тираж 130 экз. Заказ 215.
Издательско-полиграфический комплекс
Северо-Восточного федерального университета
677891, г. Якутск, ул. Белинского, 58.

Отпечатано в типографии ИПК СВФУ