

На правах рукописи



Степанов Александр Егорович

**ИССЛЕДОВАНИЯ КРУПНОМАСШТАБНЫХ СТРУКТУР  
ВЫСОКОШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ И ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО  
ДЖЕТА ПО ИЗМЕРЕНИЯМ НА ЯКУТСКОЙ ЦЕПОЧКЕ  
ИОНОЗОНДОВ И СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ**

Специальность 1.6.18 - науки об атмосфере и климате

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Якутск – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте космофизических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера Сибирского отделения Российской академии наук – обособленном подразделении Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ИКФИА СО РАН)

Научный консультант: доктор физико-математических наук, профессор, академик Российской академии наук  
**Крымский Гермоген Филиппович**

Официальные оппоненты: **Нагорский Петр Михайлович**  
доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт мониторинга и климатических и экологических систем» Сибирского отделения Российской академии наук, главный научный сотрудник.

**Котонаева Надежда Геннадьевна**  
доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт прикладной геофизики им. академика Е.К. Федорова», заместитель заведующего отделом.

**Крашенинников Игорь Васильевич**  
доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук, зав. лабораторией.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Полярный геофизический институт", Апатиты, Мурманская область

Защита состоится "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2023 г. в \_\_\_ часов на заседании диссертационного совета 24.1.197.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Ордена Трудового Красного Знамени Института солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, расположенной по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова 126а, а/я 291, ИСЗФ СО РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного учреждения науки Ордена Трудового Красного Знамени Института солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, <http://iszf.irk.ru>.

Автореферат разослан "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2023 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.1.197.01,  
к.ф.-м.н.

Ясюкевич Ю.В.

## **Общая характеристика работы**

**Предисловие.** В диссертационной работе, на основе анализа наземных и спутниковых измерений структуры и динамики ионосферы, разработана систематизация экспериментальных наблюдений, изучена природа формирования и развития таких высокоширотных ионосферных явлений как главный ионосферный провал и его полярная стенка, поляризационный джет или быстрые потоки ионосферной плазмы во время спокойных и возмущенных периодов геомагнитной активности. Основное содержание диссертации составляют результаты измерений быстрых потоков ионосферной плазмы, полученные на сети наземных станций зондирования ионосферы и их совместного анализа с данными спутниковых наблюдений за четыре цикла солнечной активности.

### **Актуальность исследований.**

Уменьшение последствий природных и природно-техногенных катастрофических событий, особенно на Крайнем Севере – сложнейшая фундаментальная научная проблема, имеющая большое научно-техническое, социальное и экономическое значение. Ее актуальность непрерывно возрастает в связи с быстрым ростом освоения арктической зоны России, увеличением техногенной нагрузки на природный комплекс, а также расширением горнодобывающего производства, добычи нефти и газа. Современные средства измерения ионосферных параметров, хотя и достаточно развиты, однако в связи с ограниченным количеством ионосферных станций в высоких широтах не всегда способны достаточно подробно охарактеризовать определенный регион на предмет реальной опасности от возможного эффекта сильной магнитной бури. Поэтому практической и актуальной задачей становится разработка и использование экспериментальных измерений и физико-математической модели с целью детального описания трехмерной структуры субполярной и полярной

ионосферы, и её структурных и динамических особенностей для реальных гелиогеофизических условий. Практическая значимость исследования заключается в непрерывном мониторинге динамики крупномасштабных ионосферных структур. Такой контроль своевременно выявит резкие градиенты измеряемых параметров и высокого уровня турбулентности ионосферной плазмы в высоких широтах, провоцирующих сбои и значительно снижающих устойчивость мобильной связи, систем радиосвязи в КВ и УКВ диапазонах и навигационных спутниковых систем GPS/ГЛОНАСС, что позволит уменьшить негативные последствия от эффектов космической погоды.

В частности, экспериментальные и теоретические исследования магнитосферно-ионосферных взаимосвязей, обусловленных физическими явлениями во время магнитных возмущений, особенно на границе плазмосферы и её проекции на ионосферные высоты, всегда вызывают интерес, т.к. на плазмопаузе и прилегающих к ней областях происходят процессы, существенно влияющие на структуру и динамику высокоширотной ионосферы Земли. Их природа до конца не выяснена, поэтому изучение морфологии влияния солнечной активности на процессы в магнитосферно-ионосферной системе, а также механизмов этого влияния до сих пор остаются весьма актуальными задачами магнитосферно-ионосферной физики.

**Цель диссертационной работы.** Основной целью работы является анализ и интерпретация результатов наблюдений многолетних комплексных наземных и спутниковых измерений параметров, характеристик и динамики высокоширотной ионосферы во время спокойных и активных периодов геомагнитной обстановки.

**Задачи исследований,** исходя из целей работы, следующие:

- интерпретация и классификация ионограмм вертикального и возвратно-наклонного зондирования высокоширотной ионосферы по измерениям на сети станций;

- исследование морфологии и динамики крупномасштабных структур авроральной и субавроральной ионосферы во время магнитных возмущений;
- сопоставление одновременных наземных и спутниковых измерений во время событий быстрых ионосферных дрейфов – поиск автографа быстрых дрейфов плазмы на субавроральных широтах по ионосферным материалам;
- измерения методом пространственно-разнесенного приема скоростей дрейфа ионосферной плазмы;
- сопоставление рядов многолетних наземных и спутниковых ионосферных данных по измерениям поляризационного джета;
- численные расчеты на модели высокоширотной ионосферы с включением дополнительного локального электрического поля;

**Методы исследований** в достижении целей работы – это наблюдения на пространственно-разнесенных установках, позволяющих осуществлять многочастотное возвратно-наклонное и вертикальное радиозондирование ионосферы в высоких широтах, а также обработка и анализ спутниковой информации во время их пролета над меридианом долготной цепочки ионозондов.

**Научная новизна** диссертационной работы определяется поставленными задачами, разработанными методами и методиками их решения, впервые полученными результатами и состоит в следующем:

- классифицированы наклонные обратные отражения по вертикальному и возвратно-наклонному зондированиям ионосферы;
- найдены автографы быстрых субавроральных дрейфов по одновременным измерениям со спутников и наземным ионосферным данным;
- резкие срывы критических частот на суточных  $f$ -графиках ионосферных данных отождествлены как признак поляризационного джета;
- методом пространственно-разнесенного приёма радиоволн (методом D1) измерены скорости дрейфа ионосферной плазмы в полосе поляризационного джета;

- синхронные спутниковые измерения инъекции энергичных ионов показывают совпадение с регистрацией поляризационного джета на сети ионосферных станций;
- сопоставление многолетних рядов наземных и спутниковых измерений демонстрирует одинаковые сезонные вариации возникновения поляризационного джета и времени появления во время магнитоактивных периодов;
- приведена эмпирическая картина восходящих и нисходящих потоков ионосферной плазмы в полосе поляризационного джета по наземным данным;
- по численным расчётам установлены количественные параметры узкого провала ионизации в широтном ходе электронной плотности в максимуме F2-слоя с учетом быстрого выноса электронной плотности;

**Научная и практическая ценность.** По данным вертикального и возвратно-наклонного зондирования высокоширотной ионосферы построены эмпирические модели, характеризующие динамику и крупномасштабную структуру полярной ионосферы в утреннем и дневном секторах в зависимости от MLT и Kp-индекса. Таким образом, эти представления дополнили модель динамики высокоширотной ионосферы в вечернем секторе. Показано, что на высокоширотных радиопереходах нарушения КВ-радиосвязи наблюдаются в неосвещенное время суток в умеренно-возмущенные зимние и равноденственные периоды, когда радиопереходы входят под область главного ионосферного провала - ионизация мала для обеспечения отражения радиоволн КВ-диапазона. При этом восстановление радиосвязи возможна на высоких (дневных) частотах при появлении полярной стенки главного ионосферного провала (ГИП). Наличие оперативной информации о положении таких ионосферных структур как полярная стенка ГИП и поляризационный джет, регистрируемые зондирующими станциями, несомненно повысит оперативность подбора частот и организацию

радиосвязи в высоких широтах.

**Достоверность и обоснованность** полученных научных и практических результатов базируется на применении научно обоснованных методов и обработки результатов многолетних измерений на меридиональной цепочке станций, анализе соответствия полученных экспериментальных и модельных исследований, в том числе, полученных другими исследовательскими коллективами и авторами.

**Основные результаты и положения диссертационной работы, выносимые на защиту:**

1. По данным Якутской меридиональной цепочки ионосферных станций разработана и предложена методика определения типов отражений и местоположения ионосферных структур по параметрам и характеристикам следов отражений на ионограммах вертикального и возвратно-наклонного зондирования. Накоплен уникальный экспериментальный ионосферный материал по вертикальному и возвратно-наклонному зондированию ионосферы.

2. По одновременным наземным и спутниковым измерениям определены признаки и «автографы» поляризованного джета – узких и быстрых дрейфов ионосферной плазмы на субавроральных широтах.

3. По данным наземных станций ионосферного зондирования выявлено, что совокупность наземных и спутниковых признаков количественно и качественно подтверждает, что и спутниковые, и наземный методы измерений регистрируют одно и то же явление на приграничных областях плазмосферы - возникновение и развитие поляризованного джета или электрического поля магнитосферного происхождения.

4. Расчёты на трехмерной модели высокоширотной ионосферы с включением локального электрического поля (2 град ширины) показали возникновение узкого провала в широтном ходе электронной концентрации в максимуме  $F2$ -слоя за счет быстрого выноса ионосферной плазмы с вечерней

стороны на дневную. Численные расчёты поляризованного джета хорошо согласуются с экспериментальными данными наземных ионосферных измерений.

**Личный вклад автора.** Все изложенные в диссертации результаты, полученные при обработке и анализе ионосферных материалов долготной цепочки получены автором либо самостоятельно, либо при его активном участии на всех этапах работы. Это относится и к основным положениям диссертационной работы, выносимым на защиту. Часть экспериментального материала получена лично автором в экспедиционных работах в пунктах Жиганск, Тикси и о. Котельный моря Лаптевых РС(Я) и измерений дрейфов методом D1 в Якутске и Жиганске в 1980-96 гг. Статьи, опубликованные по теме диссертации в соавторстве, написаны при непосредственном участии автора диссертации. Автор глубоко признателен всем своим коллегам по совместным экспериментальным и научным работам.

**Апробация работы.** Основные результаты работы и положения, выносимые на защиту, докладывались и обсуждались на:

International conference on the results of the Arcad-3 project and of the recent programmes in magnetospheric and ionospheric physics (Toulouse, France, 1984), международном симпозиуме КАПГ (Гарцау, ГДР, 1986 г.), международном симпозиуме по полярным геомагнитным явлениям (Суздаль, СССР, 1986 г.), ежегодных международных семинарах "Физика авроральных явлений" (г.Апатиты: 1999, 2001, 2004, 2005, 2015, 2018, 2020, 2023), International Symposium Interball, Kyiv-2000 (Kyiv, 2000), международной научно-практической конференции САКС-2001 (Красноярск, 2001), международном симпозиуме EGS XXV General Assembly (Nice, France, 2000), COSPAR Scientific Assembly (Warsaw, Poland, 2000), Всероссийских научных конференциях "Распространение радиоволн" (Н-Новгород, 2002; Йошкар-Ола, 2005; Ростов-на-Дону, п. Лоо, 2008; Йошкар-Ола, 2011; Иркутск, 2014; Томск, 2016; Казань, 2019; Калининград, 2021), "Problems of Geocosmos" (St.-



Petersburg: 2004, 2010, 2012, 2016), XXIII Всероссийском симпозиуме “Радиолокационное исследование природных сред” (Санкт-Петербург, 2005), международной конференции «Актуальные проблемы радиофизики» (Томск, 2008), конференции "Высокоширотные гелиогеофизические явления" (Иркутск, 2009), всероссийских конференциях "Солнечно-земная физика" (Иркутск: 2010, 2012, 2013), ежегодных конференциях «Физика плазмы в Солнечной системе» (ИКИ, Москва: 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2023), Second Varsiti General Symposium (Irkutsk, 2017), International conference GRINGAUZ-100: Plasmas in the Solar System (Moscow, 2018), а также на научных семинарах ИКИ РАН, ИКФИА СО РАН и СВФУ-ЯГУ.

Исследования по теме диссертации проведены в рамках плановых тем Отдела аэрномии Института космофизических исследований и аэрномии СО РАН. Результаты и выводы работы, полученные автором в диссертации в 1982-2021 годах, использовались в ряде хоздоговорных тем ИКФИА и в разное время поддерживались грантами РФФИ (98-05-64909-а(И), 03-05-96081-р2003арктика\_а(И), 09-05-98501-р\_восток\_а(Р), 09-05-98546-р\_восток\_а(И), 12-05-98518-р\_восток\_а(Р), 12-05-98523-р\_восток\_а(И), 15-45-05066(Р), 15-45-05090(И), 17-15-00103(Р), 18-45-140037(И)).

### **Публикации.**

Результаты, изложенные в диссертации, представлены в одной монографии (Степанов А.Е., Халипов В.Л., Голиков И.А., Бондарь Е.Д. «Поляризационный джет: узкие и быстрые дрейфы субавроральной ионосферной плазмы» – Якутск: Издательский дом СВФУ, 2017. 176 с.) и 84 научных работах, из них 21 статья в журналах, рекомендованных ВАК РФ для публикации результатов докторских диссертаций: «Геомагнетизм и аэрномия» - 14 статей, «Космические исследования» - 5 статей, «Солнечно-земная физика» – 2 статьи. Еще 6 статей опубликованы в таких зарубежных рецензируемых и индексируемых в Web of Science научных журналах, как

Advances in Space Research - 3 статьи, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics – 2 статьи, Physics and Chemistry of the Earth – 1 статья.

Итого в рецензируемых российских и зарубежных научных журналах опубликовано 27 статей, в сборниках научных трудов ИКФИА, ИЗМИРАН, ПГИ, ЯГУ-СВФУ - 11 статей; в периодических рецензируемых изданиях СиБИЗМИР-ИСЗФ - 6 статей; в трудах и материалах всесоюзных и международных конференций, и симпозиумов - 39 статей и 1 препринт ЯФ СО АН СССР.

### **Объем и структура диссертации.**

Работа состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 284 страницы текста, 102 рисунка и 7 таблиц. Список цитируемой литературы включает 299 наименований.

### **Содержание диссертации**

Во **введении** приводится краткое описание динамических структур, относящихся к теме диссертации, обосновывается актуальность темы, формулируются основные цели работы, приводится краткое содержание глав диссертационной работы и результаты, выносимые на защиту.

**Первая глава** работы посвящена описанию и развитию меридиональной цепочки ионосферных станций на северо-востоке РФ, анализу геофизической информации, получаемой из ионограмм ВЗ и ВНЗ в высоких широтах и их интерпретации и классификации.

Станции вертикального и возвратно-наклонного зондирования ионосферы (ВЗ и ВНЗ), данные которых используются в настоящей работе, до 2003 г. состояли из стандартных станций вертикального зондирования типа АИС [Васильев и др., 1961], дополнительно оснащенные антенной системой "горизонтальный ромб" (РГ) [Айзенберг, 1961]. Применение такой антенной системы совместно с антенной системой "вертикальный ромб", которым обычно оснащены станции АИС, существенно увеличивает объем получаемой информации за счет расширения интервала зондируемых широт. Якутская

цепочка ионосферных станций Якутск - Жиганск - Тикси, оборудованные АИС и оснащенные антеннами РГ, начала функционировать в середине семидесятых годов (Рис. 1). В периоды экспедиционных работ (как обычно приурочиваемых к международным интервалам наземных и спутниковых измерений) к цепочке могли присоединяться ионосферные станции на о. Котельный, в Батагае и в других местах северо-востока России (глава 1.1).

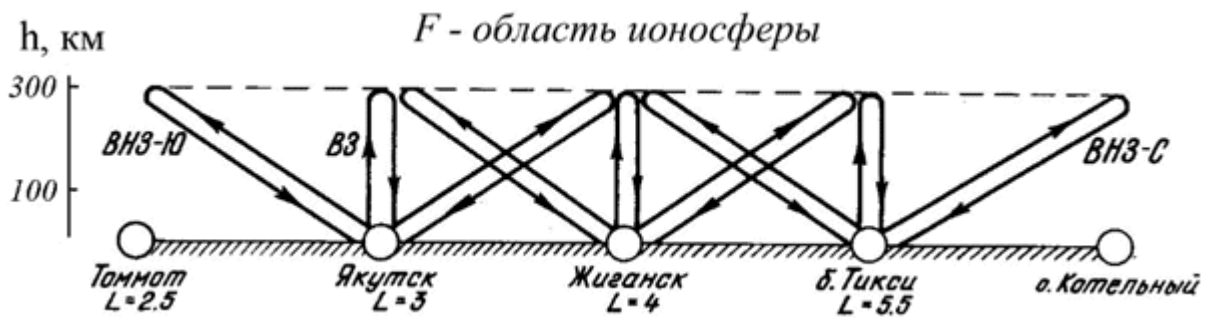


Рис. 1. Якутская меридиональная цепочка ионосферных станций ( $\lambda = 130^\circ$ ).

В практике исследований ионосферы высоких широт при анализе ионограмм исследователи часто встречались с трудностью определения отражений от регулярных слоев и интерпретации разного вида дополнительных отражений, не входящих в стандартную классификацию следов. В диссертации приводится классификация следов наклонных отражений и такая классификация нужна для однозначного их толкования различными наблюдателями, а также как основа для дальнейшей интерпретации различных следов наклонных радиоотражений. При этом, требуется учет геомагнитных координат, местного времени, геофизической возмущенности и технических характеристик оборудования. Выделены следующие 4 типа следов. Тип I. Наклонные отражения от крупномасштабных неоднородностей. К данному типу относятся отражения от полярной стенки главного ионосферного провала (или от экваториальной границы области

аномальной авроральной ионизации в F-слое ионосферы). Это «наклонники» с предельной частотой больше критической частоты регулярного слоя F в зените зондирующей станции и с наклонной дальностью до отражающей структуры больше действующей высоты регулярного F-слоя. Следы наклонных отражений этого типа по форме могут быть четкими, с запаздыванием на высокочастотном конце следа и магнитоионным расщеплением, или диффузными. Тип II. Отражения от узких провалов ионизации. По одновременным спутниковым и наземным измерениям было отождествлено, что такие следы являются "автографами" поляризационного джета на высотах области F. В условиях формирования узкого провала на f-графиках субавроральных ионосферных станций наблюдается резкое уменьшение частоты F2 (на 2 - 4 МГц и более) за короткий интервал времени (15 - 30 мин); срыв критической частоты F2 сопровождается кроме F3s-отражений от узких провалов ионизации дополнительными признаками: а) диффузностью и расслоениями следов отражений; б) явлением «лакуны F» и в) характерными отражениями от области E (Ess-косой Es). Причем эти признаки могут наблюдаться вместе или каждый в отдельности, видимо, в зависимости от широты расположения станции наблюдения и уровня геомагнитной активности. Тип III. Отражения от дуг полярных сияний. Это следы наклонно отраженных от ионосферы сигналов, регистрируемых в моменты появления дуг полярных сияний на станции ионосферного зондирования. Отражения на ионограмме имеют вид многоярусных прямых следов без заметного группового запаздывания вблизи предельных частот. Причем не критический характер наклонных отражений этого типа следует из того, что отражения с меньших дальностей не создают условий экранировки. Тип IV. Наклонные радиоотражения от F-слоя в экваториальной зоне главного ионосферного провала. Данные отражения характерны для дневного времени и относительно спокойных геомагнитных условий, когда "днище" главного ионосферного провала расположено на широтах  $L > 3$ . На ионограммах

вертикального зондирования следы "наклонников" этого типа наблюдаются одновременно с регулярными зеркальными отражениями от F-слоя и расположены на высотах выше регулярных отражений от F-слоя. Эти отражения могут иметь или не иметь запаздывание на высокочастотном конце, и их предельные частоты всегда меньше критических частот регулярных отражений. По всем признакам они связаны с наклонами F-слоя или перемещающимися ионосферными возмущениями на экваториальном краю главного ионосферного провала (глава 1.2).

В главе 1.3 рассмотрена статистическая модель положения полярной стенки главного ионосферного провала в утреннем секторе (00.00-07.00 MLT) при различных условиях геомагнитной активности. Модель положения полярной границы главного ионосферного провала для утреннего сектора MLT при разных уровнях геомагнитной активности описывается следующим выражением:

$$\Lambda_0 = (68.9 - 3.57 K_p + 0.29 K_p^2) + (0.21 - 0.25 K_p + 0.025 K_p^2) \text{ MLT}.$$

В главе 1.4 рассмотрены результаты наклонного зондирования субавроральной ионосферы по измерениям дигизондов (цифровых ионозондов) на однокачковой радиотрассе и численные расчеты на параболической модели. Синхронизированные по GPS прием и передача сигналов дают возможность записать сигналы как от вертикального, так и наклонного зондирований, открывая новые возможности для исследований.

**Во второй главе** приводятся измерения сгустков ионизации в высокоширотной ионосфере и предложен механизм их формирования в дневной области ионосферы. Термин «блоб» или крупномасштабный сгусток ионосферной плазмы (КСИП) используется для описания явления в цепочке область дневного полярного каспа/клефта - полярная шапка - ночная авроральная зона, которое идентифицируется оптическими, ионозондовыми и спутниковыми измерениями. По наземным данным сгусток распознается как аномальное повышение частоты (или плотности) в ночные часы, когда на

высотах F-слоя нет источников ионизации плазмы. Такой характер следов отражений дает основание предполагать, что эти области повышенной плотности сформированы не локально. Обратное трассирование по траекториям крупномасштабной конвекции в высоких широтах и полярной шапке предполагает, что сгустки плазмы приходят с более полярных широт, чем широта станции наблюдения, т.е. с области полярной шапки (Рис. 2). Повышение, а затем понижение частоты радиоотражений указывает на то, что сгусток сначала входит в "поле зрения" ионозонда, а затем выходит из него (многочастотное зондирование направленным пучком проводится вдоль геомагнитного меридиана на север). Возможной причиной может быть только то, что скорость дрейфового движения сгустка плазмы немного больше чем скорость коротации на высотах ионосферы. Ниже мы кратко просуммируем основные параметры и характеристики КСИП, полученные наземными и спутниковыми методами измерений: в вечерне-утреннем секторе местного времени, со станции Тикси, расположенной на инвариантной широте  $65.1^\circ$ , можно наблюдать крупномасштабные сгустки ионосферной плазмы, конвектирующие через полярную шапку с дневной стороны; спутниковые и наземные данные показывают, что в некоторых случаях за период наблюдений регистрируются несколько плазменных сгустков; Предположено, что сгустки плазмы формируются в области дневного каспа во время резких изменений параметров ММП, меняющих направление конвекции, когда за счет сжатия ионосферной плазмы при «встречных» курсах возникает сгусток с повышенными значениями плотности.

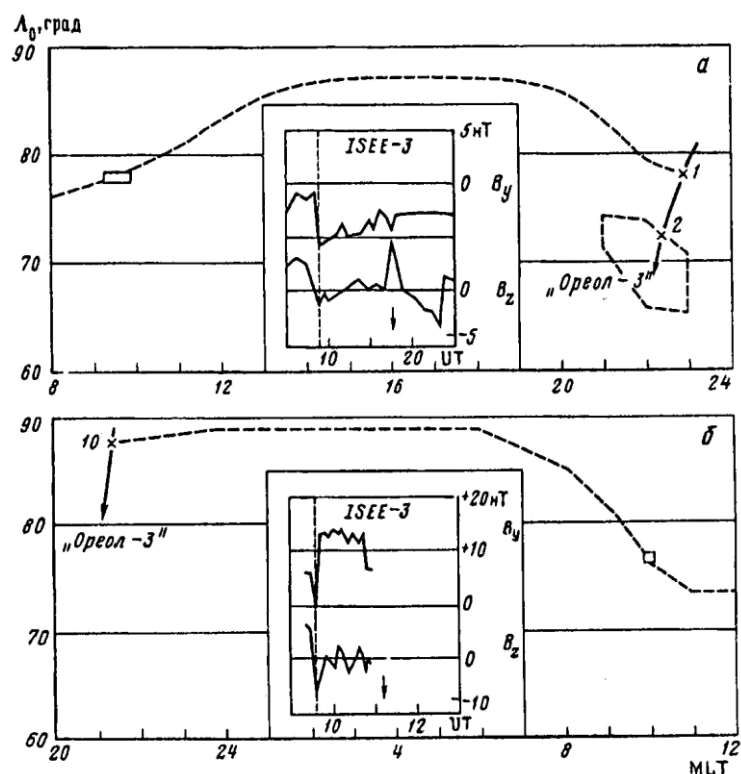


Рис. 2. Траектории сгустков (штриховые линии), рассчитанные по модели [Левитин и др., 1984]. Прямоугольником на траектории отмечена область полярного каспа; сплошные линии - траектория спутника "Ореол-3". В центре графика приведены вариации параметров ММП; вертикальной штриховой линией показаны моменты резких изменений ММП - моменты формирования плазменных сгустков, а стрелкой - моменты регистрации сгустков спутником "Ореол-3".

В главе 2.3 анализируются результаты прямых измерений ионной концентрации и электронной температуры со спутника "Космос-900", прямые измерения каспа со спутников DMSP, а также регистрации наземных наклонных радиоотражений от резких широтных градиентов электронной плотности на границе каспа/клефта. Анализ комплексных данных по измерениям тепловой плазмы в ионосфере и вторгающихся электронов в дневном каспе установил характерные полярные пики в широтном

распределении Ne и Te протяженностью около 2°, которые являются ионосферным признаком дневного полярного каспа. По синхронным измерениям показано, что используя ионозонд, расположенный на инвариантной широте  $IL=65^\circ$  и оснащенный горизонтальной ромбической антенной для наклонного зондирования, можно проводить систематический мониторинг области дневного полярного каспа/клефта.

Глава 2.4 содержит результаты исследования признаков и параметров перемещающихся ионосферных возмущений по данным станций в северо-восточной части России. Исследование показало, что количество регистраций признаков ПИВ в более спокойные периоды выше чем в возмущенные периоды; большинство признаков приходятся на уровни  $K_p \leq 3$ ; местное время регистрации признаков ПИВ приходится на интервал времени с 9 до 15 часов MLT; средние фазовые скорости ПИВ около 200 м/с, периоды от 50 до 100 мин, а горизонтальные размеры 300-400 км;

В конце второй главы приведен анализ работы радиолиний Якутского радиоцентра (субавроральные радиолинии), который показал, что нарушения радиосвязи на субполярных радиолиниях начинаются на главной фазе геомагнитных бурь и продолжаются на фазе восстановления. Число дней, охваченных не прохождением радиоволн КВ-диапазона, зависит от общего уровня магнитной активности. При равных значениях уровня возмущенности продолжительные нарушения радиосвязи наблюдались в тех бурях, которые характеризуются более высокими значениями  $K_p$  индекса.

В начале **третьей главы** приводится краткая история исследований поляризационного джета их характеристики и параметры, терминология, а также первые наземные наблюдения поляризационного джета: его «автограф» на ионограммах вертикального радиозондирования и его динамика в ходе развития геомагнитной возмущенности.

На Рис. 3 приведены результаты одновременных измерений скорости дрейфа ионов (а), концентрации ионов (б) со спутника АЕ-С и параметров



ионосферы (в) со станции ВЗ в Тикси. Жирная стрелка указывает положение полярной стенки провала по данным станции в Тикси.

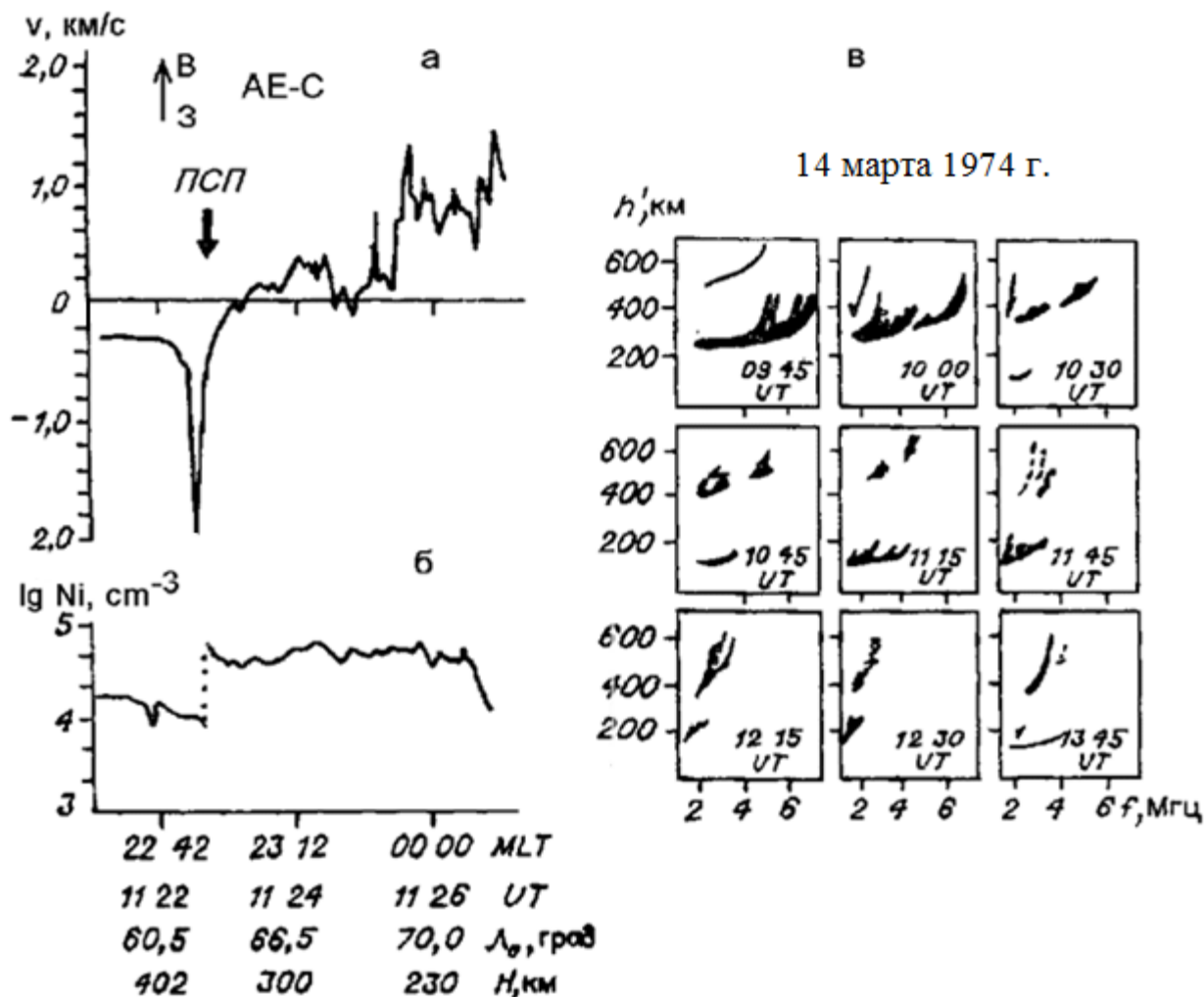


Рис. 3. Результаты одновременных измерений скорости дрейфа ионов (а), концентрации ионов (б) со спутника АЕ-С и параметров ионосферы (в) на станции ВЗ Тикси.

На Рис. 4, в качестве примера, приведена ионограмма ВЗ ст. Якутск, полученная дигизондом DPS-4, в момент формирования поляризационного джета над станцией 21 ноября 2002 г. в 16.45 местного времени. На

ионограмме видны следы отражений от регулярного слоя F2 и спорадический след F3s от поляризационного джета.

Таким образом, прямыми сопоставлениями спутниковых и наземных измерений показано, что на ионограммах ВЗ ионосферным признаком (или «автографом») развития поляризационного джета над станцией наблюдения является дополнительный характерный след отражения - F3s-отражение, критическая частота которого всегда ниже критической частоты регулярного F2-слоя, а виртуальная высота выше минимальной высоты слоя F2. В этой же главе приводятся также данные наземных измерений скоростей дрейфа ионосферной плазмы в полосе поляризационного джета методом пространственно-разнесенного приема сигналов, который довольно подробно описан в работах [Галкин и др., 1971; Казимировский и Кокоуров, 1979; Жеребцов и др., 1988].

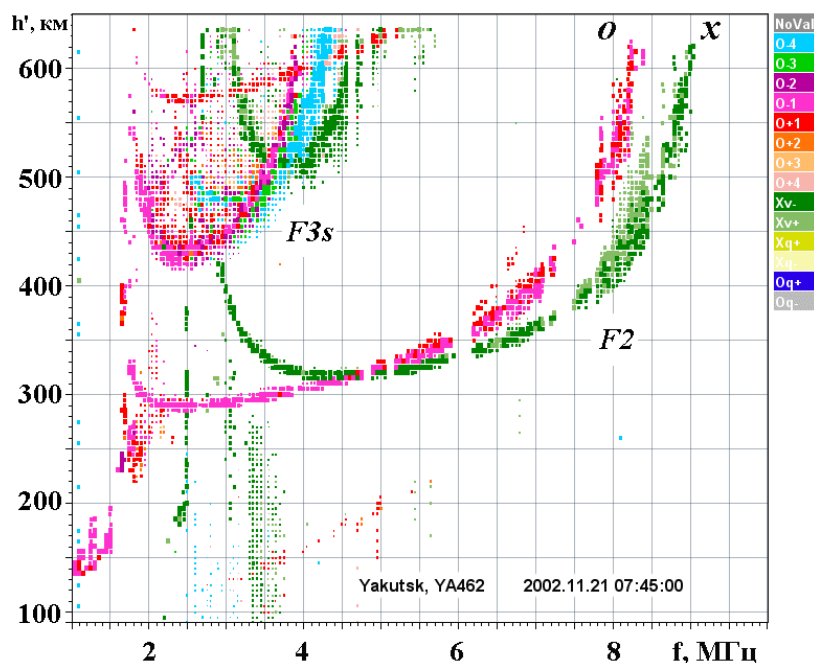


Рис. 4. Дополнительный характерный след отражения (F3s), зарегистрированный на ст. Якутск 21 ноября 2002 г. в 16.45 местного времени.

В четвертой главе приведена морфология и динамика быстрых субавроральных ионных дрейфов (поляризационного джета) по наземным и спутниковым данным. Рассматриваются многолетние ионосферные материалы, полученные на Якутской меридиональной цепочке ионосферных станций. Цепочка расположена вдоль восточной долготы  $\sim 130^\circ$  на L-параметрах от 3.0 до 6.0 и состоит из трех основных пунктов — Тикси, Жиганск, Якутск. Она долгие годы представляла собой систему из трех однотипных, разнесенных примерно на 620 км вдоль магнитного меридиана совмещенных ионозондов вертикального и возвратно-наклонного радиозондирования ионосферы. Во время экспедиционных работ в 1968–1969 и 1973–1974 гг. измерения параметров ионосферы проводились также в Батагае. Широтное положение всех этих станций охватывает почти всю высокоширотную область ионосферы и дает возможность непрерывно следить за структурой и динамикой основных образований в авроральной и субавроральной ионосфере. Ионосферные станции Якутск (с ноября 2002 по август 2017 г.) и Жиганск (с ноября 2003 г.) были оснащены цифровыми ионозондами DPS-4.

Основным ионосферным признаком возникновения или развития поляризационного джета (ПД) вблизи зенита станции наблюдения является дополнительный след отражений на ионограмме вертикального зондирования, который классифицируется как F3<sub>s</sub>-отражение. Этот признак или «автограф» ПД, установленный по одновременным спутниковым и наземным наблюдениям, подробно описан в работах [Решетников и др., 1987; Гальперин и др., 1990; Степанов и др., 2017]. Такие спорадические следы расположены на большей дальности, чем следы от регулярного слоя F2 и имеют меньшие критические частоты, чем частота регулярного фонового слоя F2. В моменты развития ПД могут дополнительно наблюдаться кратковременные частичное или полное поглощения радиоволн; нередко

явлению ПД сопутствуют авроральные спорадические слои  $E_{sr}$  и  $E_{sa}$ . Часто возникновение ПД сопровождается развитием лакуны, которая характеризуется исчезновением отражений в некоторой полосе частот на ионограмме, при этом практически не наблюдается возрастание поглощения. После появлений на ионограммах дополнительных спорадических следов отражений, критические частоты фонового слоя F2 в большинстве случаев начинают резко уменьшаться, т. е. в течение 15–45 мин после регистрации дополнительных следов частоты снижаются на 2–4 МГц и более или наблюдается срыв критической частоты (СКЧ) слоя. Таким образом, под СКЧ подразумевается резкое снижение критической частоты регулярного слоя F на как минимум 2–4 МГц в течение 15–45 минут. Далее, в большинстве случаев на ионограммах проявляются условия А (экранировка слоя F2 нижележащим слоем) или В (полное поглощение радиоволн), которые вместе с основными параметрами ионосферы фиксируются на суточных f-графиках. Таким образом, СКЧ четко проявляется при стандартной обработке ионосферных данных и в нашей работе представляет один из основных критериев отбора события. Следовательно, отбор данных о присутствии или возникновении ПД вблизи или над станцией наблюдения в 14:00–24:00 MLT проводился по наличию СКЧ на суточных f-графиках ионосферных станций, что существенно ускоряет выборку данных. Отметим, что мы пользовались только теми данными, которые были уже обработаны по стандартной методике и хранились в библиотечном архиве данных Института. При выборе события фиксировались название станции, год, месяц, дата и местное время начала СКЧ F-слоя. Следует отметить, что атмосферно-ионосферные взаимодействия в виде отрицательных ионосферных возмущений в нашей работе не учитываются, так как мы считаем, что проявления СКЧ скоротечны и вызваны геофизическими факторами во время магнитных бурь и суббурь. По ионосферной станции Якутск были просмотрены и проанализированы ионосферные данные с 1955 по 2015 гг. (в совокупности около 60 лет или 594

обработанных месяца) [Степанов и др., 2019]. Отобрано для анализа 744 события СКЧ или признаков ПД. По ст. Батагай проанализированы данные за 1968–1969 и 1973–1974 гг. (в совокупности около 27 месяцев данных). Из них для анализа отобрано 56 событий СКЧ. По ст. Жиганск проанализированы данные за 1976–1979 и 1984 гг. (в совокупности около 54 месяцев данных). Отобрано для анализа 116 событий СКЧ. По ст. Тикси просмотрены и проанализированы данные за 1965–1972, 1976–1982 и 1985–1994 гг. (в совокупности 231 месяц). Найдено для анализа 631 событие СКЧ.

Общее количество найденных событий СКЧ по данным ионосферных станций Якутской меридиональной цепочки составило 1547 событий. Отметим, что периоды отсутствия ионосферных данных в обработанных рядах несущественны и объясняются в большинстве случаев поломкой или ремонтом станции зондирования, а также профилактическими или иными работами в зданиях ионосферных станций. Отсутствие ионосферных данных может быть обусловлено также геофизическими факторами, влияющими на экранировку отражений и поглощение радиоволн на высокоширотных станциях.

Одним из основных вопросов для любого массива геофизических данных является вопрос о частоте (вероятности) наблюдения рассматриваемого явления в зависимости от геомагнитной обстановки, местоположения станции наблюдения, местного времени и т. п. После нормализации полученных данных, так как количество найденных и проанализированных событий СКЧ значительно различается по станциям, стало заметно, что частота регистрации СКЧ растет от низких широт к высоким, т. е. вероятность наблюдения признаков ПД на ст. Тикси выше, чем на ст. Жиганск—Батагай (данные станций объединены в один массив данных из-за близкого широтного расположения) и ст. Якутск. Также стало заметно, что средние значения индекса  $K_p$ , при которых наиболее часто регистрируются СКЧ на станциях наблюдения, увеличиваются при смещении к низким широтам. На Рис. 5

приведены общее и раздельное по станциям количества наблюдений СКЧ по месяцам года. Видно, что вероятность наблюдений срывов выше в равноденственные месяцы (март–апрель, сентябрь–октябрь) и существенно ниже в летние и зимние месяцы года.

На Рис. 6 слева в полярных координатах показана интенсивность вероятности появления СКЧ в зависимости от местного времени и инвариантной широты, а справа — интенсивность распределения СКЧ в зависимости от уровня геомагнитной возмущенности и инвариантной широты. Видно, что СКЧ по наземным ионосферным данным в основном регистрируются в ранние вечерние часы (17–19 MLT). С увеличением геомагнитной активности пик интенсивности наблюдений СКЧ смещается от высоких к низким инвариантным широтам.

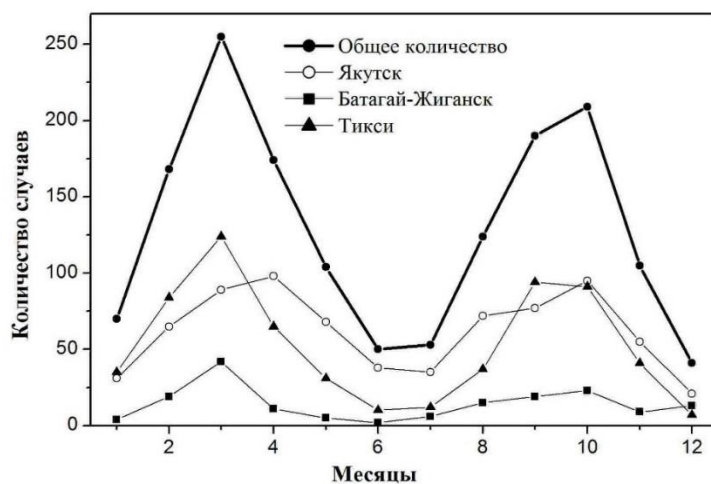


Рис. 5. Сезонный ход наблюдений СКЧ по ионосферным данным

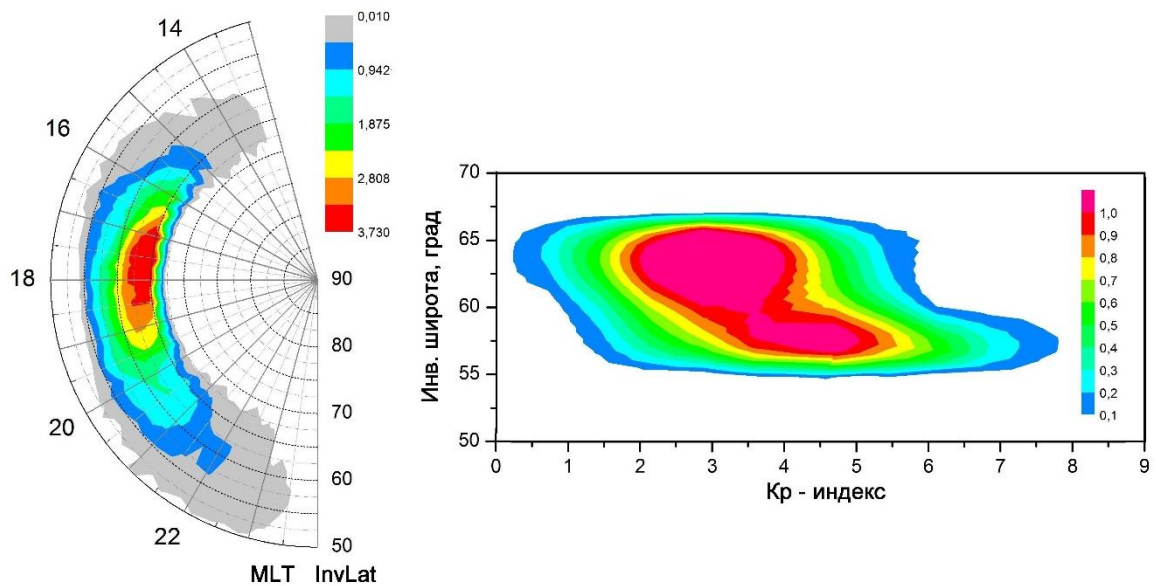


Рис. 6. Интенсивность вероятности появления СКЧ (слева) и распределения СКЧ от уровня геомагнитной возмущенности (справа).

Таким образом, показано, что наблюдаемые на  $f$ -графиках срывы критических частот (за период с 1955 по 2015 гг.) являются ионосферным признаком развития быстрых субавроральных ионных дрейфов к западу, удобным для оперативного анализа архивных данных наземных ионосферных станций.

По многолетним спутниковым данным в работе [He et al., 2014], впервые были исследованы солнечно-циклические, сезонные и суточные вариации субаврорального ионного дрейфа (Subauroral Ion Drifts – SAID). Наблюдения велись со спутников DMSP F8–F18 в течение 1987–2012 гг. и обнаружили 18226 событий SAID. Критерии определения SAID по спутниковым данным были следующие:

- пик горизонтальной скорости превышает 1000 м/с;
- ширина менее  $4^\circ$ ;
- событие расположено экваториальнее авроральной зоны в вечернем и полуночном секторах;

— полярная кромка западных ионных дрейфов совпадает или примыкает к экваториальной границе потоков высыпающихся электронов.

Наиболее важным результатом сопоставления наземных [Степанов и др., 2019] и спутниковых [He et al., 2014] измерений является то, что сезонные вариации частоты регистраций SAID и регистраций СКЧ близко совпадают, показывая максимумы в равноденственные месяцы года и минимумы в зимние и летние месяцы. Такой результат, показанный на Рис. 7, а, однозначно указывает на то, что и наземные, и спутниковые методы измерений регистрируют одно и то же явление вблизи границы плазмопаузы, которое проецируется вдоль силовых линий на субавроральные широты. На Рис. 7, б приведено нормализованное распределение вероятности появления SAID (ступенчатая диаграмма), которое дает максимум его регистрации примерно в 21:15 MLT. Временной интервал наблюдения растянут с 16:00 до 02:00 MLT. Усредненные наземные измерения СКЧ (штриховая линия) при временном интервале от 14:00 до 01:00 MLT дают максимум регистрации СКЧ примерно в 17:30 MLT, что почти на 4 ч раньше, чем дают спутниковые наблюдения. Такое большое расхождение по времени порождало много вопросов о механизмах и факторах возникновения и развития ПД, SAID и SAPS, подразумевая, что есть другие факторы, влияющие именно на локализацию и местное магнитное время быстрых субавроральных потоков ионосферной плазмы.

В работе [He et al., 2017] по данным спутников DMSP приведены результаты исследования SAPS во время интенсивных бурь — intense storms, ISs (рассмотрено 37 событий) и суббурь спокойного времени — quiet time substorms, QSs (рассмотрено 30 событий). К IS авторы относят бури, которые имеют минимальные значения  $Dst < -100$  нТл; к QS относят суббури, которые имеют максимальное значение  $AE > 500$  нТл и максимальное абсолютное значение  $Dst < 10$  нТл в течение всего дня. В работе анализируются также данные межпланетного магнитного поля, динамического давления солнечного



ветра, вариации Dst и AE-индексов. Показано, что характеристики и параметры SAPS различны во время развития интенсивных бурь и суббурь спокойного времени. Одним из существенных отличий является время появления SAPS — при сильно возмущенных условиях время регистрации SAPS сдвигается в ранние вечерние часы (к 17–19 MLT). На Рис. 8 на верхней панели показано нормализованное время частоты появления SAPS в период ISs (наружная левая ось ординат) и местное магнитное время наблюдения СКЧ по наземным ионосферным данным (точки, соединенные линией и количество событий на левой оси ординат с внутренней стороны).

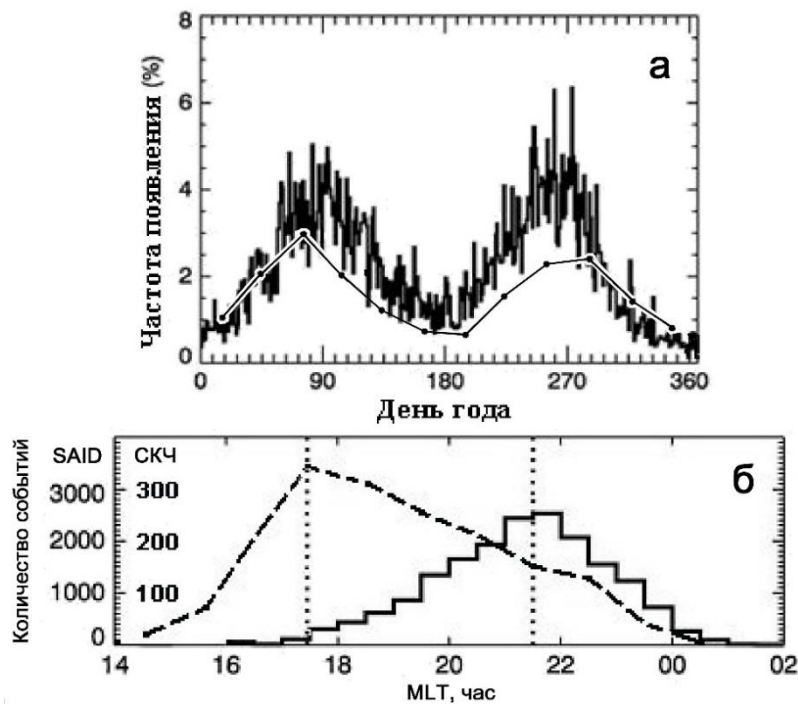


Рис. 7. Сопоставление наземных и спутниковых данных: а — сезонный ход частоты регистрации срывов по наземным данным (черные точки) и частоты появления SAID; б — время регистраций срывов частоты (пунктирная линия) и SAID по данным DMSP.

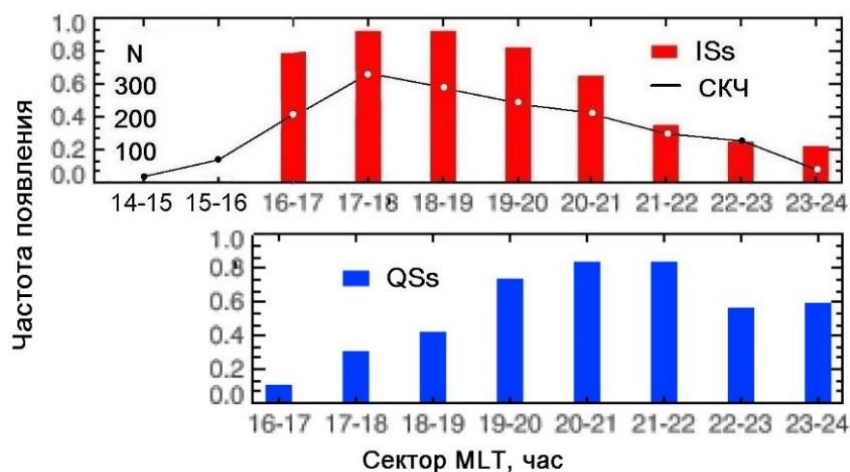


Рис. 8. Местное магнитное время наблюдения срывов критической частоты по наземным данным (точки) и нормализованное появление SAPS во время интенсивных бурь по данным спутников DMSP (столбики).

На нижней панели — нормализованное время частоты появления SAPS в период QSs. Видно, что ход наземных данных времени регистрации СКЧ близко совпадает с ходом времени появления SAPS по спутниковым данным в период интенсивных бурь. Следовательно, можно заключить, что большинство наблюдаемых СКЧ по наземным данным относятся к ISs, как они были определены в работе [He et al., 2017].

Таким образом, на основе анализа большого массива наземных ионосферных данных и сопоставления их со спутниковыми материалами можно сделать следующие выводы: сезонный ход частоты появления SAID по спутниковым данным и сезонный ход частоты появления СКЧ по наземным измерениям обнаруживают одинаковые вариации: максимумы в равноденственные месяцы года и минимумы в летние и зимние месяцы года. Это качественно подтверждает, что и спутниковые, и предложенный наземный методы измерений регистрируют одно и то же явление на приграничных областях плазмосферы - возникновение и развитие электрических полей магнитосферного происхождения; показано, что местное

магнитное время регистрации СКЧ по наземным данным близко совпадает со временем регистрации SAPS по спутниковым данным во время интенсивных бурь.

Следовательно, большинство наблюдаемых СКЧ по наземным данным относятся к периодам развития интенсивных бурь как они были определены в работе [He et al., 2017].

В данной главе диссертации также анализируются данные по регистрации поляризационного джета на долготно-разнесенных ионосферных станциях Якутск и Подкаменная Тунгуска с вариациями AE-индекса с минутным разрешением. Показано, что запаздывание в появлении ПД относительно вспышки AE-индекса минимально для суббуревых событий вблизи местной магнитной полуночи. При этом во многих случаях эти события приходятся на фазу взрыва суббури. Среднее время начала поляризационного джета на ст. Подкаменная Тунгуска, во время изолированных суббурь запаздывает примерно на один час по сравнению с моментом начала поляризационного джета на ст. Якутск, что определяется скоростью перемещения источника с востока на запад.

В **пятой главе** рассмотрены механизмы генерации сильных локальных электрических полей магнитосферного происхождения, формирование поляризационного джета в ходе взрывной фазы суббури, а также дрейфы ионосферной плазмы в полосе поляризационного джета. Основные механизмы формирования поляризационного джета приведены в работах [Southwood and Wolf, 1978; Деминов и др., 1986; Mishin and Streltsov, 2020] и др.

По анализу экспериментальных событий поляризационного джета, можно утверждать, что когда формирование ПД происходит над станцией, его запаздывание после момента вспышки может быть весьма мало ( $\leq 10$  мин.), то есть происходить ещё во время фазы вспышки. При этом локальная магнитная вариация может быть весьма похожа на быстрое прохождение над станцией разрыва Харанга в направлении с востока к западу. Эти эффекты наблюдаются

не всегда, причем случаи их наблюдений относятся к околополуночному сектору на  $L = 3$ , т.е. соответствуют высокой активности ( $AE \geq 500$  нТ) на широте ст. Якутск.

Синхронные наземные и спутниковые измерения показали, что эти два вида измерений хорошо согласуются между собой и описывают одну и ту же физическую картину вблизи области плазмопаузы. По наземным доплеровским измерениям на ионосферной станции Якутск обнаружено, что во время регистрации быстрого западного дрейфа плазмы наблюдается возрастание вертикального дрейфа плазмы до 50–150 м/с. Показано, что во время сильного геомагнитного возмущения 23.06.2005 г. спутники DMSP наблюдали восходящие потоки плазмы над полосой поляризационного джета со скоростями до 1.2 км/с. в течение пяти с половиной часов.

По наземным доплеровским измерениям на ионосферной ст. Якутск обнаружено, что в периоды наблюдения поляризационного джета скорости горизонтальных и вертикальных дрейфов существенно выше, чем их фоновые значения. Скорости горизонтального дрейфа плазмы составляют, в среднем, ~300–600 м/с (есть события со скоростями 900–1000 м/с). Скорости вертикальной составляющей дрейфа, также в среднем, составляют 30–50 м/с (есть события со скоростями 100–150 м/с).

По результатам доплеровских измерений на субавроральной ионосферной станции Якутск также показано, что при развитии поляризационного джета над станцией наблюдения значения пиков вертикальных скоростей дрейфа плазмы относительно пиков горизонтальных скоростей могут не совпадать по времени и направлению, вызывая различные ситуации их взаиморасположения (Рис. 9).

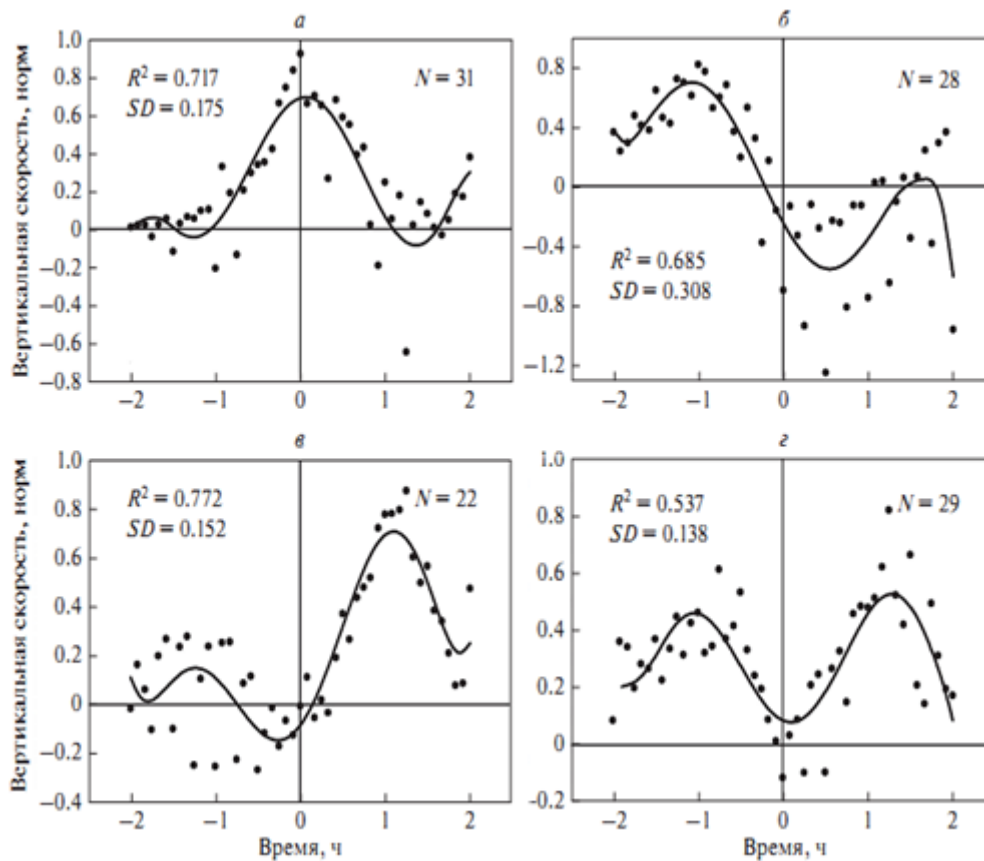


Рис. 9. Горизонтальные и вертикальные скорости дрейфа ионосферной плазмы в полосе поляризационного джета. Кривые на рисунках – аппроксимирующие линии, точки – нормализованные значения скоростей.

На Рис. 10 приведены начальные и конечные результаты численных расчетов для интервала 16:00 – 20:00 ч местного времени. Верхние панели (а, б, в, г) показывают задаваемые для расчетов начальные значения и интервал времени для горизонтальных ( $V_{гор}$ ) и вертикальных ( $V_{вер}$ ) компонент скорости дрейфа ионосферной плазмы. По оси абсцисс отложено время включения и выключения скоростей. Нижние панели (а', б', в', г') представляют, соответственно, расчетные вариации суточных параметров F2-слоя после вычислений на модели высокоширотной ионосферы – толстые кривые означают вариации плотности электронов слоя F2, а тонкие – вариации высоты максимума слоя.

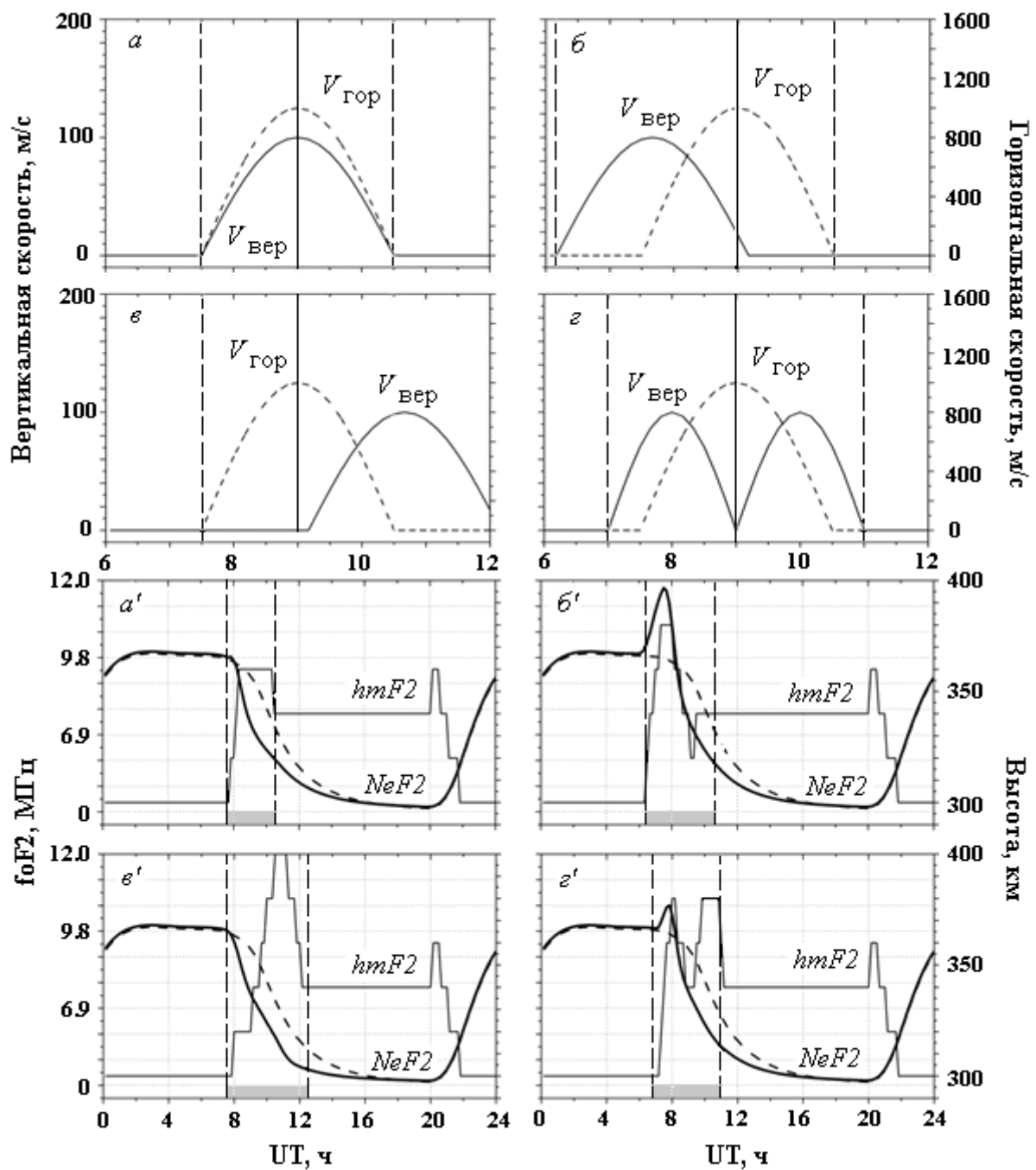


Рис. 10. (а, б, в, г) – задаваемые значения горизонтальных и вертикальных компонент скоростей поляризационного джета; (а', б', в', г') – суточные значения плотности электронов  $N_e F2$  в максимуме слоя F2 (жирные кривые) и высоты максимума слоя  $h_m F2$  (тонкие кривые). Толстые штриховые линии – значения плотности электронов без включения скоростей.

В **шестой главе** приведены результаты численного моделирования на трёхмерной модели высокоширотной ионосферы с учётом включения локального электрического поля магнитосферного происхождения. Сделано сопоставление результатов расчетов и экспериментальных данных в условиях формирования в субавроральной ионосфере поляризационного джета. Показана роль электрического поля магнитосферного происхождения в формировании узкого провала в широтном ходе электронной концентрации максимума F2-слоя в вечернем секторе в период суббурь.

В ходе сопоставления модельных и экспериментальных результатов по формированию и развитию поляризационного джета на субавроральных широтах получено следующее:

–Результаты расчетов с помощью высокоширотной модели показывают хорошее согласие с экспериментальными измерениями по регистрации поляризационного джета.

–Во всех вариантах расчетов (различные задаваемые значения горизонтальных и вертикальных компонент скоростей поляризационного джета – см. Рис. 10) наличие вертикальных и горизонтальных скоростей в полосе ПД приводит к резким падениям критических частот (срывам) и подъему минимальных высот слоя F2.

–Возможным объяснением повышения критических частот слоя F2 или роста  $N_e F2$  перед их резкими срывами является уменьшение скоростей рекомбинации ионов из-за увеличения высоты-максимума слоя, что ведет к накоплению ионов на этих высотах.

–Другое объяснение такого повышения плотности на высотах слоя F2 может заключаться в «сгонке ионизации», или в неадиабатическом сжатии ионосферной плазмы, когда быстрый западный поток плазмы в полосе ПД сталкивается с менее быстрым потоком крупномасштабной конвекции.

–Рост критической частоты слоя F2 является дополнительным признаком развития ПД над станцией наблюдения.

В **заключении** сформулированы основные результаты и выводы проделанной работы по анализу многолетних радиофизических измерений высокоширотной ионосферы в северо-восточной части РФ.

### **Цитируемая в автореферате литература.**

1. Васильев Г.В., Васильев К.Н., Гончаров Л.П. Автоматическая панорамная ионосферная станция типа АИС // Геомагнетизм и аэрономия. Т.1. №1. 120-125. 1961.
2. Галкин А.И., Ерофеев Н.М., Казимировский Э.С., Кокоуров В.Д. Ионосферные измерения. М: Наука, 174 с. 1971.
3. Гальперин Ю.И., Сивцева Л.Д., Филиппов В.М., Халипов В.Л. Субавроральная верхняя ионосфера. Новосибирск: Наука. 192 с. 1990.
4. Деминов М.Г., Ким В.П., Шубин В.Н. Электрические поля в неосвещенной субавроральной ионосфере. Препринт № 56(670). М.: ИЗМИРАН. 1986.
5. Жеребцов Г.А., Мизун Ю.Г., Мингалев В.С. Физические процессы в полярной ионосфере. М: Наука. 232 с.1988.
6. Казимировский Э.С, Кокоуров В.Д. Движения в ионосфере. М: Наука. 344 с. 1979.
7. Решетников Д.Д., Филиппов В.М., Байшев Д.Г., Степанов А.Е., Андреев Р.П., Эверстов А.И., Гальперин Ю.И., Халипов В.Л., Сивцева Л.Д., Шестакова Л.В., Афонин В.В., Алексеев В.Н., Соловьев В.С. Морфология и динамика узких провалов ионизации в субавроральной области F. Якутск: ЯФ СО АН СССР. 39 с. 1987.
8. Степанов А.Е., Халипов В.Л., Голиков И.А., Бондарь Е.Д. «Поляризационный джет: узкие и быстрые дрейфы субавроральной ионосферной плазмы». Якутск: Издательский дом СВФУ. 2017. 176 с.



9. Степанов А.Е., Кобякова С.Е., Халипов В.Л. Наблюдение быстрых субавроральных дрейфов ионосферной плазмы по данным Якутской меридиональной цепочки станций // Солнечно-земная физика. Т. 5. № 4. С. 73 – 79. DOI статьи 10.12737/szf-54201908. 2019

10. He F., Zhang X.-X., Chen B. Solar Cycle, Seasonal, and Diurnal Variations of Subauroral Ion Drifts: Statistical Results // J. Geophys. Res. V.119. NA6. P.5076-5086. 2014.

11. He F., Zhang X.-X., Wang W., Wan. W. Different evolution patterns of subauroral polarization streams (SAPS) during intense storms and quiet time substorms // Geophys. Res. Lett., V. 44, P. 10796-10804. DOI: 10.1002/2017GL075449. 2017.

12. Mishin E. and Streltsov A. Prebreakup arc intensification due to short circuiting of mesoscale plasma flows over the plasmopause // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 125(5), e2019JA027666. <https://doi.org/10.1029/2019JA027666>. 2020

13. Southwood D.J. and Wolf R.A. An assesment of the role of precipitation in magnetospheric convection // J. Geophys. Res. V. 83. NA11. P. 5227– 5332. 1978.

**Список основных работ, опубликованных автором по теме диссертации.**

Монография:

Степанов А.Е., Халипов В.Л., Голиков И.А., Бондарь Е.Д. «Поляризационный джет: узкие и быстрые дрейфы субавроральной ионосферной плазмы» – Якутск: Издательский дом СВФУ. 176 с. 2017.

Статьи в рецензируемых периодических изданиях:

1. Халипов В.Л., Степанов А.Е., Новопашина Е.Ю. Модель положения полярной кромки ионосферного провала в утреннем секторе // Геомагнетизм и аэрномия, 27, N5, с. 842-843, 1987.
2. Филиппов В.М., Решетников Д.Д., Халипов В.Л., Соловьев В.С., Степанов А.Е., Гальперин Ю.И., Мулярчик Т.М. Комплексные наблюдения узких провалов ионизации в области F наземными и спутниковыми методами // Космические исследования, 27, N4, с. 568-584, 1989.
3. Степанов А.Е., Гальперин Ю.И., Беген К., Серов А.А. Измерения крупномасштабных сгустков ионосферной плазмы в полярных широтах со спутника Ореол-3 // Космические исследования, 30, N4, с. 534-542, 1992.
4. Shestakova L.V., Stepanov A.E., Khalipov V.L., Mamrukov A.P., Filippov L.D., Zikrach E.K., Afonin V.V. High-Latitude Ionosphere Structure in Dayside Sector on Ground-Based and Satellite Measurements // Advances in Space Research, 20, N3, p. 415-418, 1997.
5. Шестакова Л.В., Афонин В.В., Халипов В.Л., Степанов А.Е., Зикрач Э.К. Особенности высокоширотной ионосферы в полуденные часы во время возмущения 29 августа 1979 г. // Геомагнетизм и аэрномия, 38, N3, 174-178, 1998.
6. Зикрач Э.К., Шестакова Л.В., Степанов А.Е., Халипов В.Л., Плотников И.Я., Афонин В.В. Эффект асимметрии в изменениях плотности и температуры плазмы на широтах главного ионосферного провала в сопряженных полушариях // Геомагнетизм и аэрномия, 39, N4, 118-120, 1999.
7. Afonin V.V., Alexeyev V.N., Ievenko I.B., Khalipov V.L., Stepanov A.E., Erasov A.N., Kondabarov A.V. Satellite and Ground-Based Measurements of the SAR-Arc Phenomena // Physics and Chemistry of the Earth, 25(N1-2):63-66, 2000.

8. Халипов В.Л., Афонин В.В., Алексеев В.Н., Иевенко И.Б., Степанов А.Е., Кондабаров А.В., Мокроусов М.И. Спутниковые и наземные измерения в области стабильных авроральных красных дуг // Геомагнетизм и аэрномия, 40, N2, 112-116, 2000.
9. Халипов В.Л., Гальперин Ю.И., Степанов А.Е., Шестакова Л.В. Формирование поляризационного джета в ходе взрывной фазы суббури: результаты наземных измерений // Космические исследования, 39, N3, 244 -253, 2001.
10. Иевенко И.Б., Халипов В.Л., Алексеев В.Н., Степанов А.Е. Динамика ионизации слоя F2 в области диффузного сияния и SAR-дуги во время суббурь // Геомагнетизм и аэрномия, 41, N5, 642-649, 2001.
11. Khalipov V.L., Galperin Yu.I., Stepanov A.E., Bondar' E.D. Formation of polarization jet during injection of ions into the inner magnetosphere // Advances in Space Research, 31, N5, 1303-1308, 2003.
12. Жеребцов Г.А., Пирог О.М., Полех Н.М., Ратовский К.Г., Смирнов В.Ф., Степанов А.Е., Дзянькуй Ши, Хао Ванг. Ионосферная обстановка в восточно-азиатском долготном секторе во время геоактивного периода октябрь-ноябрь 2003 г. // Геомагнетизм и аэрномия, т.45, N1, с. 106 - 113, 2005.
13. Степанов А.Е., Халипов В.Л., Бондарь Е.Д. Сопоставление характеристик поляризационного джета на разнесенных станциях Якутск - Подкаменная Тунгуска // Космические исследования, 46, N2, 116-121, 2008.
14. Куркин В.И., Полех Н.М., Пирог О.М., Поддельский И.Н., Степанов А.Е. Ионосферные возмущения в Северо-Восточном регионе по данным ионозондов в периоды равноденствия // Космические исследования, т. 46, N4, с. 348-355, 2008.
15. Kurkin V.I., Pirog O.M., Polekh N.M., Mikhalev A.V., Poddelsky I.N., Stepanov A.E.. Ionospheric response to geomagnetic disturbances in the north-eastern region of Asia during the minimum of 23rd cycle of solar activity //

- Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, V. 70, N18, 2346–2357, 2008.
16. Ievenko I.B., Stepanov A.E., Alexeyev V.N., Smirnov V.F. Dynamics of the convection in the inner magnetosphere by observations of the diffuse aurora, SAR arc and ionospheric drift // *Advances in Space Research*, 43, N7, 1130–1134, 2009.
  17. Баишев Д.Г., Баркова Е.С., Степанов А.Е., Rich F., Yumoto K. Электрические поля и крупномасштабные волны свечения в вечернем секторе диффузной авроральной зоны // *Геомагнетизм и аэрономия*, 50, N1, 44-50, 2010.
  18. Степанов А.Е., Голиков И.А., Попов В.И., Бондарь Е.Д., Халипов В.Л. Структурные особенности субавроральной ионосферы при возникновении поляризационного джета // *Геомагнетизм и аэрономия*, 51, N5, 643-649, 2011.
  19. Клименко М.В., Клименко В.В., Бессараб Ф.С., Ратовский К.Г., Захаренкова И.Е., Носиков И.А., Степанов А.Е., Котова Д.С., Воробьев В.Г., Ягодкина О.И. Влияние геомагнитных бурь 26-30 сентября 2011 года на ионосферу и распространение радиоволн КВ диапазона. I – Ионосферные эффекты // *Геомагнетизм и аэрономия*, 55, № 6, 769–789, 2015. [DOI: 10.7868/S0016794015050077](https://doi.org/10.7868/S0016794015050077)
  20. Халипов В.Л., Степанов А.Е., Котова Г.А., Бондарь Е.Д. Вариации положения поляризационного джета и границы инжекции энергичных ионов во время суббурь // *Геомагнетизм и аэрономия*, 56, №2, 187-193, 2016, [DOI: 10.7868/S0016794016020085](https://doi.org/10.7868/S0016794016020085)
  21. Степанов А.Е., Халипов В.Л., Котова Г.А., Заболоцкий М.С., Голиков И.А. Данные наблюдений крупномасштабной конвекции плазмы в магнитосфере в зависимости от уровня геомагнитной активности // *Геомагнетизм и аэрономия*, 56, №2, 194-199, 2016, [DOI: 10.7868/S0016794016010119](https://doi.org/10.7868/S0016794016010119)

22. Халипов В.Л., Степанов А.Е., Котова Г.А., Кобякова С.Е., Богданов В.В., Кайсин А.В., Панченко В.А. Вертикальные скорости дрейфа плазмы при наблюдении поляризационного джета по наземным доплеровским измерениям и данным дрейфометров на спутниках DMSP // Геомагнетизм и аэрномия, 56, №5, 568-578, 2016, DOI: [10.7868/S0016794016050060](https://doi.org/10.7868/S0016794016050060)
23. Баишев Д.Г., Самсонов С.Н., Моисеев А.В., Бороев Р.Н., Степанов А.Е., Козлов В.И., Корсаков А.А., Торопов А.А., Йошикава А., Юмото К. Мониторинг и исследование эффектов космической погоды с помощью меридиональной цепочки инструментов в Якутии: краткий обзор // Солнечно-земная физика, 2017. Т. 3. № 2. с.27-35. DOI: [10.12737/22607](https://doi.org/10.12737/22607).
24. Khalipov V.L., Stepanov A.E., Ievenko I.B., Kotova G.A., Panchenko V.A. Formation of Red Arc in the polarization jet band // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 179, N11, 494-503, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.08.005>
25. Степанов А.Е., Халипов В.Л., Кобякова С.Е., Котова Г.А. Результаты наблюдений дрейфов ионосферной плазмы в области поляризационного джета // Геомагнетизм и аэрномия, 59, №5, 578-581, 2019. DOI: [10.1134/S0016794019050134](https://doi.org/10.1134/S0016794019050134)
26. Степанов А.Е., Кобякова С.Е., Халипов В.Л. Наблюдение быстрых субавроральных дрейфов ионосферной плазмы по данным Якутской меридиональной цепочки станций // Солнечно-земная физика, том 5, № 4, 2019, стр. 73 – 79. DOI: [10.12737/szf-54201908](https://doi.org/10.12737/szf-54201908)
27. Степанов А.Е., Гололобов А.Ю., Халипов В.Л., Голиков И.А. Вариации ионосферных параметров при формировании поляризационного джета // Геомагнетизм и аэрномия, том 60, №1, с. 60-65. 2021. DOI: [10.31857/S0016794021010156](https://doi.org/10.31857/S0016794021010156)