



УТВЕРЖДАЮ

И.о. директора ПГИ

д.ф.-м.н.

 /Мингалев И.В./

« 19 » сентября 2023 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного научного учреждения
«Полярный геофизический институт»
на диссертацию Степанова А.Е.
«Исследования крупномасштабных структур высокоширотной ионосферы и
поляризационного джета по измерениям на якутской цепочке ионозондов и
спутниковым данным»,
представленную на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук
по специальности 1.6.18 – «науки об атмосфере и климате»

Диссертация А.Е. Степанова «Исследования крупномасштабных структур высокоширотной ионосферы и поляризационного джета по измерениям на якутской цепочке ионозондов и спутниковым данным» суммирует работы автора по исследованию характеристик авроральной и субавроральной ионосферы, выполненные в течение более 3-х десятков лет. Основой работы является анализ экспериментальных данных, полученных на Якутской меридиональной цепочке ионосферных станций, и данные наблюдений низковысотных спутников с полярной орбитой. Работа направлена на исследования морфологии и динамики крупномасштабных структур авроральной и субавроральной ионосферы в спокойные периоды и во время геомагнитных возмущений, изучению скоростей дрейфа ионосферной плазмы и сопоставлению одновременных наземных и спутниковых измерений, как во время отдельных событий, так и за периоды многолетних наблюдений. Одним из основных достижений автора является выделение специфических характеристик ионосферной плазмы, позволяющих по результатам наземных наблюдений определить появление таких ионосферных структур как полярная стенка главного ионосферного провала, крупномасштабные сгустки ионосферной плазмы в полярной шапке и поляризационный джет на субавроральных широтах. Выделение таких признаков оказалось возможным в результате тщательного анализа одновременных наземных и спутниковых наблюдений.

Результаты проведенных автором исследований могут быть использованы для создания системы непрерывного мониторинга положения и динамики крупномасштабных

ионосферных структур по наблюдениям пространственно-разнесенных станций ионосферного зондирования, которая должна осуществлять непрерывный контроль параметров ионосферы, влияющих на устойчивость систем мобильной связи, на работу систем радиосвязи в КВ и УКВ диапазонах, а также на точность позиционирования по данным навигационных спутников.

Полученные в диссертационной работе результаты могут быть использованы для коррекции существующих в настоящее время эмпирических моделей ионосферы и адаптации этих моделей к текущей геомагнитной обстановке, определяемой параметрами межпланетной среды и уровнем геомагнитной активности. Последнее особенно важно для прогнозирования, как устойчивой работы, так и вероятности возможного появления сбоев в работе всех систем радиосвязи в субавроральных и авроральных широтах. Использование измерений на меридиональной сети ионосферных станций позволит оперативно контролировать основные параметры главного ионосферного провала и положение его полярной кромки и определить диапазон рабочих частот КВ радиолиний.

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. Объем диссертации: 284 страниц текста, 102 рисунка и 7 таблиц. Список литературы содержит 299 ссылок.

Во введении сформулирована цель работы, ее актуальность, научная и практическая значимость, научная новизна полученных результатов, положения, выносимые на защиту, кратко изложено содержание диссертации.

Первая глава посвящена описанию меридиональной цепочки ионосферных станций вертикального и возвратно-наклонного зондирования ионосферы (ВЗ) и (ВНЗ), анализу геофизической информации, получаемой из ионограмм ВЗ и ВНЗ в высоких широтах, их интерпретации и классификации. В диссертации приводится классификация следов наклонных отражений, необходимая для однозначного их толкования различными наблюдателями, а также как основа для дальнейшей интерпретации различных следов наклонных отражений. Рассмотрены характеристики главного ионосферного провала в утреннем секторе при различных уровнях геомагнитной активности.

Во второй главе приводятся результаты исследования крупномасштабных сгустков ионосферной плазмы, когда на высотах F-слоя нет источников ионизации. Такие облака плазмы с горизонтальными размерами от 100 км до 1000 км дрейфуют от полуденного сектора аврорального овала в антисолнечном направлении через полярную шапку со скоростями 0.3 – 1.0 км/с. В результате анализа большого массива наземных и спутниковых данных определены критерии для распознавания сгустков плазмы на ионограммах ВЗ и ВНЗ. Сгусток распознается как аномальное увеличение электронной концентрации (частоты отражений) в ночные часы в несколько раз превышающее фоновый уровень. След отражения от сгустка плазмы имеет критическую частоту, которая

выше критической частоты регулярного слоя F, минимальная частота следа отражений от ионосферы порядка 1-1.5 МГц.

Трассирование облаков плазмы назад по времени показало, что траектории сгустков идут из области каспа, а время их формирования совпадает с резкими изменениями в Vz или Vy компонентах межпланетного магнитного поля. Предложен механизм формирования облаков повышенной плотности плазмы на приполюсной границе каспа, основанный на нарушении условий вмороженности. Исследованы структурные особенности дневной ионосферы на широтах каспа по наземным и спутниковым данным.

Проведен статистический анализ нарушения радиосвязи, который показал, что максимальный процент отказов радиосвязи наблюдается в часы, когда радиолинии входят под область главного ионосферного провала, где ионизация мала для обеспечения отражения радиоволн КВ-диапазона. Использование измерений на меридиональной сети станций ВЗ и ВНЗ позволяет оперативно контролировать основные параметры главного ионосферного провала и положение его полярной кромки, а также определять диапазон рабочих частот КВ радиолиний.

В третьей главе приводится краткая история исследований поляризационного джета (ПД), его характеристики и параметры. Определены характерные черты поляризационного джета на ионограммах ВЗ и его динамика в ходе развития геомагнитных возмущений. Показано, что узкая полоса быстрого дрейфа ионов к западу приводит к быстрому формированию (в течение 15 - 30 мин) узких и глубоких провалов ионизации или углублению уже существующего главного провала вблизи его полярной стенки из-за процессов выноса плазмы из этой области на дневную сторону и изменения скоростей некоторых фотохимических реакций. Анализ результатов одновременных наблюдений со спутников и данных якутской меридиональной цепочки станций ВЗ и ВНЗ подтверждает, что положение узкого провала ионизации совпадает по времени и пространству с регистрациями на спутниках узкой полосы высокой скорости западного дрейфа (то есть сильного электрического поля, направленного к полюсу).

Использование данных наземного ВНЗ в отдельных случаях позволило по характерным следам наклонных и вертикальных отражений проследить динамику и широтные смещения узкого провала ионизации и оценить время их жизни. Метод ВНЗ дает возможность слежения за узким провалом ионизации в диапазоне широт примерно $\pm 3^\circ$ от зенита станции наблюдения, а при вертикальном зондировании этот диапазон составляет всего около $\pm 1.5^\circ$.

По данным наземного ионосферного радиозондирования обнаружено, что начало формирования узкого провала ионизации в вечернем секторе в основном приходится на фазу роста положительной бухты в H-компоненте геомагнитного поля. Положение узкой

полосы быстрого дрейфа локализовано всегда внутри главного ионосферного провала экваториальнее его полярной стенки. Разница по широте варьируется в пределах от $\sim 1^\circ$ до 10° инвариантной широты, при этом в начальный момент развития суббури эта разница может быть больше, чем в конце или в период фазы восстановления суббури.

Для измерения движений в ионосфере использован метод приема радиосигналов на разнесенных приемных антеннах. Показано, что в области узкого джета скорости конвекции ионосферной плазмы резко возрастают до $\sim 700 \div 800$ м/с. Время существования поляризационного джета при наблюдениях на одном меридиане составляет ~ 2 -3 часа, после чего узкий провал постепенно сливается с широкой полосой дрейфа в ГИП.

Четвертая глава диссертации посвящена исследования морфологии и динамики поляризационного джета по наземным и спутниковым данным. Одним из основных критериев отбора событий ПД является срыв критической частоты (СКЧ) слоя F2, под которым понимается быстрое уменьшение критической частоты регулярного слоя F2 как минимум на 2-4 МГц в течение 15–45 минут. Проведено сопоставление многолетних наблюдений ПД по наземным данным и данным спутников серии DMSP.

Определено среднее время задержки регистрации поляризационного джета между станциями Якутск и Подкаменная Тунгуска, которое составляет ~ 60 мин. Это соответствует средней скорости распространения джета на уровне ионосферы в западном направлении ~ 600 м/с и скорости центробежного и градиентного дрейфа ионов с энергией ~ 20 кэВ во внутренней магнитосфере.

На значительном статистическом материале показано, что широта экваториальной границы ПД уменьшается с ростом уровня магнитной активности в авроральной зоне. Статистически экваториальная граница ПД, развивающегося в ионосфере в периоды суббури, находится на той же L-оболочке, что и граница инжекции ионов с энергией до ~ 50 кэВ, положение которой определялось по наблюдениям спутников AMPTE/CSE.

В пятой и шестой главах диссертации представлен довольно основательный обзор механизмов генерации сильных локальных электрических полей и формирования в субавроральной области поляризационного джета в периоды магнитосферных суббурь. Показано, что формирование ПД происходит в предполуночном секторе уже в период фазы развития суббури с последующим его распространением в западном направлении со скоростью в несколько сотен м/с. Показано, что в периоды наблюдения поляризационного джета скорости горизонтальных и вертикальных дрейфов ионосферной плазмы существенно выше, чем их фоновые значения. Скорости горизонтального дрейфа плазмы в среднем составляют ~ 300 –600 м/с, а вертикального ~ 30 –50 м/с.

Проведены численные расчеты распределения электронной (ионной) концентрации F области субавроральной ионосферы при включении локальных электрических полей

разной интенсивности. Показано, что в области включения электрического поля формируется узкий провал в широтном ходе электронной концентрации максимума F2-слоя за счет выноса ионосферной плазмы с вечерней стороны на дневную. Исследованы сезонные особенности проявления поляризационного джета и влияние вертикальных и горизонтальных скоростей в полосе ПД на критическую частоту и высоту слоя F2.

В заключении суммируются основные результаты диссертации. Диссертация хорошо оформлена, изложена ясным языком. Содержание работы многократно докладывалось на международных и российских конференциях и семинарах. Автореферат полностью отражает содержание работы.

Стоит отметить ряд замечаний к диссертации. По-видимому, автор недостаточно тщательно переработал тексты статей, относящихся к теме диссертации, поскольку некоторые результаты неоднократно повторяются в различных главах работы. Несколько замечаний возникает к главе 2 диссертационной работы, которая посвящена изучению крупномасштабных сгустков ионосферной плазмы (КСИП) и ионосферных характеристик полярного каспа. Основные результаты этого раздела были получены около 3-х десятков лет тому назад, но автор сохранил их в первоначальном виде без какого-либо дополнительного анализа и сопоставления с современными представлениями. Отметим, что около магнитопаузы и во всем магнитослое скорость плазмы существенно ниже альфеновской, поэтому, согласно работе [Antonova et al., JASTP. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2022.105994>], здесь не выполняются условия вмороженности и, соответственно, использовать уравнения МГД для описания механизма формирования КСИП нужно с крайней осторожностью.

Высыпания дневного сектора состоят из двух областей — это высокоширотная овальная зона мягких высыпаний и экваториальнее её квазикруговая зона более жестких (электроны 6-8 кэВ) высыпаний. По широте между этими областями существует разрыв в высыпаниях, который наблюдается во все периоды, но наиболее ярко выражен при наличии магнитной активности, особенно на фазе восстановления геомагнитных возмущений. Этот разрыв в высыпаниях, по нашему мнению, и соответствует дневному минимуму электронной концентрации. Тогда полярная кромка дневного ионосферного провала будет соответствовать экваториальному краю области мягких высыпаний, но не экваториальной границе каспа.

Область мягких высыпаний по мере увеличения широты состоит из высыпаний типа BPS (высыпания, подобные ночному плазменному слою), LLBL (высыпания низкоширотного граничного слоя), касп и плазменная мантия. Дуги сияний располагаются в области высыпаний BPS и частично в LLBL, в каспе высыпаются наиболее низкоэнергичные частицы (электроны с $E < 200$ эВ) и здесь отсутствуют ускорения.

Большие электронные температуры можно ожидать экваториальнее каспа. Если суммировать все регистрации каспа по наземным ВНЗ измерениям, представленные на рис. 2.10, то окажется, что с наибольшей вероятностью касп наблюдался в интервалах 08-10 MLT и 14-16 MLT. Однако, хорошо известно по спутниковым наблюдениям, что касп с наибольшей вероятностью наблюдается в околополуденные часы, а в обозначенные выше интервалы вероятность наблюдения каспа минимальна. В работе [Воробьев, Данилова, Зверев. ГиА. 1992. Т. 32. № 1. С95-99.] по данным ВНЗ обсерватории Норильск и оптическим наблюдениям на о. Хейса (ЗФИ) показано, что наклонные отражения регистрируются в интервале 12-16 MLT с наибольшей вероятностью около 14 MLT на широтах 70° - 76° CGL. Пространственные отражения связаны не с каспом, а с дискретными формами сияний и регистрируются в периоды резкого увеличения их интенсивности, либо в начальный период формирования новых ярких дуг сияний.

По многочисленным наблюдениям спутников серии DMSP широтные размеры каспа на высотах ионосферы в редких случаях (большая положительная компонента V_z межпланетного магнитного поля, большое динамическое давление солнечного ветра) могут достигать 2.0° – 2.5° по широте, однако средние размеры каспа всего $\sim 1^{\circ}$ по широте. Определить наличие и положение такого узкого образования наземными методами – ни магнитометрическими, ни оптическими, ни ионосферными – невозможно. Поэтому для идентификации и исследования каспа используются исключительно спутниковые наблюдения. Вероятно, по этой причине автор и не включил результаты этого раздела в список основных результатов диссертационной работы. Поэтому и мы будем рассматривать этот раздел в качестве исторической ретроспективы.

Однако приведенные выше замечания не влияют на общую высокую оценку диссертации. Работа является крупным исследованием, посвященным разработке и изучению ионосферных характеристик крупномасштабных структур авроральной и субавроральной ионосферы. Особенно следует отметить большую роль автора в исследовании характеристик поляризационного джета. Основные результаты этих исследований изложены в коллективной монографии, в которой Степанов А.Е. является первым автором.

Таким образом, диссертация А.Е. Степанова «Исследования крупномасштабных структур высокоширотной ионосферы и поляризационного джета по измерениям на якутской цепочке ионозондов и спутниковым данным» соответствует всем критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора наук, установленным в «Положении о порядке присуждения ученых степеней», утверждённом постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842 с

дополнениями от 21 апреля 2016 года № 335, а сам Степанов Александр Егорович, безусловно, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических по специальности 1.6.18 – науки об атмосфере и климате.

Автореферат полностью и правильно отражает содержание диссертации.

Отзыв составил главный научный сотрудник Полярного геофизического института, д.ф.-м.н. по специальности 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы Вячеслав Георгиевич Воробьев.

Результаты диссертации и проект отзыва были рассмотрены и одобрены на заседании семинара Полярного геофизического института 14.09.2023 года.

Главный научный сотрудник Полярного геофизического института,

д.ф.-м.н.



/Воробьев В.Г./

184209, г. Апатиты Мурманской области, ул. Академгородок, д. 26а, ПГИ,

Телефон: +7 815 55 76530, адрес электронной почты: admin@pgia.ru

Подпись д.ф.-м.н. Воробьева В.Г. заверяю

Ученый секретарь Полярного геофизического института



_____ Попова Т.А.

« 19 сентября 2023 г.»