

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу
Степанова Александра Егоровича «Исследования крупномасштабных структур высокоширотной ионосферы и поляризационного джета по измерениям на якутской цепочке ионозондов и спутниковых наблюдений»,
представленную на соискание ученой степени доктора
физико-математических наук по специальности
1.6.18 – «Науки об атмосфере и климате»

I. Диссертационная работа А.Е. Степанова посвящена решению крупной междисциплинарной научной проблемы: *«Исследование в реальных гелиогеофизических условиях фундаментальных закономерностей формирования под воздействием возмущений космической погоды структуры и динамики крупномасштабных неоднородностей субполярной и полярной ионосферы внутрисуточного масштаба, приводящих к снижению качества либо потере связи в КВ и УКВ диапазонах, мобильной связи и спутниковой навигации»*.

II. Актуальность

Влияние опасных и неблагоприятных явлений, обусловленных космической погодой, проявляется, в первую очередь, в том, что экономика и общество несут потери, которые могут оказываться деструктивным фактором их развития. В ряду таких опасных явлений находится и ряд физических процессов в ближнем космосе, происходящих на субполярных и полярных широтах, где наиболее ярко проявляется воздействие солнечной активности (космической погоды) на атмосферу, магнитосферу и ионосферу Земли, на функционирование технических комплексов различного назначения (в первую очередь связи, навигации, радиолокации и телекоммуникации) и биологических систем. Несмотря на то, что экспериментальные и теоретические исследования магнитосферно-ионосферных связей, обусловленных текущим состоянием космической погоды, проводятся несколько десятилетий, их природа во многом не ясна, поэтому исследования воздействия космической погоды на процессы в системе магнитосфера – ионосфера – атмосфера являются *весьма актуальными*. В целом, проблеме электродинамики верхней атмосферы и ближнего космоса субполярных регионов уделяется пристальное внимание (п. 20е Стратегии научно-технологического развития РФ).

III. Цель исследований

Основной предмет анализируемой работы – явление, которое наблюдается только в субполярных-полярных областях в окрестности проекции плазмопаузы на высотах F -области ионосферы: узкие струи (потoki) быстрых субавроральных дрейфов ионов на запад, которые проявляются во время суббурь (поляризационный джет, ПД).

IV. Структура и объем работы Диссертационная работа А.Е. Степанова состоит из Введения, шести Глав, Заключение, Списка литературы (299 наименований), содержит 284 стр. текста, 102 рисунка, 7 таблиц.

Общая характеристика работы. Исследованию ПД в диссертационной работе посвящены Главы 3-6. Две первых Главы посвящены аппаратурным вопросам (Якутская меридиональная цепочка ионосферных станций), измерениям крупномасштабных ионосферных струк-

тур в высоких широтах, исследованию дневной ионосферы на широтах каспа и перемещающихся ионосферных возмущений. Ввиду того, что исследуемая научная проблема носит междисциплинарный характер, автор работы разделил обзорную часть и поместил её основные разделы в главах, в которых обсуждаются экспериментальные и теоретические вопросы исследования ПД (разделы 3.1, 5.1).

Во **Введении**: обозначена цель и дано обоснование актуальности диссертационной работы; определён круг решаемых в ней задач; сформулированы выносимые на защиту научные положения, указаны их новизна, научная и практическая значимость.

В **Первой главе**: а) обсуждены технические и методические вопросы, связанные с развитием и функционированием Якутской меридиональной цепочки ионосферных станций с 1956 г. по настоящее время; б) указано, что следы наклонных отражений на ионограммах ВЗ и ВНЗ являются одним из основных источников информации для определения положения, параметров и динамики крупномасштабных структур ионизации в *E*- и *F*-областях субполярной и полярной ионосферы; в) отмечено отсутствие единого методического подхода к обработке и интерпретации следов наклонных отражений на ионограммах; г) предложен, на основе систематизации следов на ионограммах, единый подход к обработке и интерпретации ионограмм при наклонном зондировании в высоких широтах; д) предложено соотношение, задающее положение ГИП в утреннем секторе, отличающееся от известных тем, что у него нет общего хода к низким широтам при различных условиях геомагнитной активности.

Здесь необходимо отметить большую научно-техническую, методическую и организационную работу, проведенную автором, по превращению ряда ионосферных станций на меридиане Якутска в единую систему, позволяющую проводить исследования крупномасштабных ионосферных структур в высоких широтах методами вертикального (ВЗ), наклонного (НЗ) и возвратно-наклонного (ВНЗ) зондирования ионосферы.

Вторая глава посвящена экспериментальным исследованиям ионосферных структур в высоких широтах, сопоставимых по своим пространственно-временным масштабам с ПД: а) крупномасштабные сгустки ионосферной плазмы (КСИП) и механизмы их формирования в плазме дневной высокоширотной ионосферы; б) особенности структуры дневной ионосферы на широтах каспа по наземным и спутниковым данным; в) перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ). В последнем разделе приведен анализ нарушений связи на субавроральных радиоперелиях Якутского радицентра.

Анализ данных наземных и спутниковых наблюдений позволил уточнить характеристики КСИП: а) КСИП – область с увеличенной электронной концентрацией, с размерами ~ 100-1000 км по горизонтали; б) сгустки плазмы дрейфуют из области каспа в антисолнечном направлении поперек полярной шапки; в) сезонный ход частоты появления КСИП имеет максимум в зимние месяцы.

По измерениям тепловой плазмы в ионосфере со спутника K-900 и вторгающихся электронов со спутников DMSP: а) уточнено положение полярного каспа; б) показано, что использование ионозонда с горизонтальной ромбической антенной (инвариантная широта ~ 65°) позволяет проводить систематический мониторинг области полярного каспа.

Подтверждены, для высоких широт, характерные значения параметров ПИВ¹, полученные ранее в средних широтах: а) «крючки» на ионограммах в основном регистрируются во время спокойных интервалов геомагнитной активности; б) средние фазовые скорости ПИВ ~ 200 м/с, период 50-100 минут, горизонтальный размер 300-400 км; в) местное время регистрации ПИВ на ионограммах приходится в большинстве случаев на интервал с 9 до 15 часов.

Показано, что на субавроральных радиоперелиях (северо-восток России) нарушения радиосвязи: а) наблюдаются в неосвещенное время суток в умеренно-возмущенные зимние и равноденственные периоды, когда ионосферная часть радиоперелии находится в области главного ионосферного провала; б) восстановление радиосвязи возможно при отражении радиосигнала от полярной стенки ГИП; в) во время геомагнитных бурь на субполярных радиоперелиях нарушения радиосвязи регистрируются на главной фазе и продолжаются на фазе восстановления; г) магнитные бури, развивающиеся на возмущенном фоне, приводят к максимальному количеству отказов на субавроральных линиях в первый день; д) для бурь, развивающихся на спокойном фоне, максимум отказов регистрируется на второй день после их начала.

В Третьей главе (первый раздел) приведена история исследований ПД, которые проводились под руководством проф. Ю.И. Гальперина и в которых автор работы принял самое активное участие.

Анализ совместных случаев спутниковых и наземных измерений характеристик субавроральной ионосферы позволил определить характерные значения параметров ПД: а) при наблюдении в вечернем секторе (наземные измерения) момент возникновения ПД обычно приходится на фазу зарождения или развития суббури; б) местоположение узких провалов ионизации по L -оболочке по данным наземных и спутниковых методов показывает хорошее совпадение, что позволяет исследовать морфологию узких провалов по данным ионосферного зондирования; в) физической причиной появления узких провалов ионизации в ночной субавроральной зоне является процесс выноса тепловой ионосферной и магнитосферной плазмы из-за дрейфа на запад; г) методом пространственно-разнесенного приема установлено, что в области узкого провала возрастают скорости конвекции ионосферной плазмы (до ~ 700÷800 м/с); д) получены оценки характерного времени существования явления ПД, так, при наблюдении на одном меридиане ПД имеет характерную длительность ~ 2-3 часа; е) во время развития ПД скорости дрейфа не остаются постоянными, а их уменьшение до наблюдаемых в области дна главного провала величин происходит в период слияния узкого провала с ГИП.

Большая часть результатов Главы была либо получена впервые, либо практически одновременно и независимо от других групп исследователей.

Четвертая глава посвящена морфологии и пространственно-временной динамике ПД по данным наземных и спутниковых измерений.

Сравнительный анализ наземных ионосферных и спутниковых данных позволил автору сделать следующее заключение: для сезонных зависимостей частот появления SubAuroral Ion

¹В выдающейся работе С.О. Nines'а вскрыта физическая причина появления ПИВ – прохождение внутренних гравитационных волн в нейтральной атмосфере через область отражения КВ-радиосигнала вблизи максимума слоя F . Обнаружены отклики ПИВ на ионограммах были гораздо раньше – во второй половине 30-х годов прошлого века [Лихачев А.И. Слои G // Доклады АН СССР. 1939. Т. 25. С. 589-591; Лихачев А.И. Типы высотно - частотных характеристик при вертикальном падении // Журнал технической физики. 1940. Т.10. С. 1434-1446].

Drifts и срывов критических частот (СКЧ) выявлено согласованное поведение. Т.о., срывы СКЧ на f -графиках являются ионосферным признаком развития быстрых субавроральных ионных дрейфов к западу. Этот вывод позволил включить в анализ огромный архив данных наземных ионосферных станций, разнесённых как по широте (Якутская меридиональная цепочка), так и по долготе (от м. Шмидта до Мурманска). В результате: а) показано, что СКЧ в основном регистрируются в ранние вечерние часы; б) установлено, что максимум интенсивности СКЧ с увеличением геомагнитной активности смещается к более низким инвариантным широтам; в) выявлено, что вероятность регистрации СКЧ выше в равноденствие и ниже во время солнцестояния; г) показано, что существуют два варианта развития ПД; д) установлено, что запаздывание в появлении ПД относительно вспышки АЕ-индекса минимально для суббуриевых событий вблизи местной магнитной полуночи.

По результатам анализа данных синхронных измерений положения границы инжекции энергичных ионов во время суббурь и регистрации ПД на сети ионосферных станций автором установлено: а) совпадение экваториальной границы ПД с границей инжекции энергичных ионов позволило установить причину, приводящую к формированию ПД; б) в вечернем секторе чаще наблюдаются размытые по энергии «носые структуры», а в околополуночном секторе чаще наблюдается общая резкая граница для ионов всех энергий.

Оценки пространственно-временной динамики ПД по совместным данным наземных и спутниковых измерений над территорией Российской Арктики получены автором впервые.

В пятой главе обсуждаются возможные механизмы генерации сильных электрических полей, приводящие к формированию ПД, а также проанализированы времена появления ПД и скорости дрейфа плазмы ионосферы при ПД.

Предложенная и реализованная автором методика определения параметров ПД по данным ионосферного зондирования позволила существенно уточнить и дополнить характеристики структуры и динамики ПД, полученные ранее по спутниковым данным. Важную роль в этом сыграла существенно бóльшая статистика ионосферных данных по сравнению со спутниковыми. В результате: а) установлено, что запаздывание появления ПД относительно вспышки АЕ-индекса вблизи местной магнитной полуночи минимально, для вечернего сектора среднее время запаздывания составляет $\sim 1.0-1.5$ часа; б) установлено, что на $L \approx 3-4$ скорость перемещения источника поляризованного джета по данным разнесённых по долготе станций составляет $\sim 800-900$ м/с, причем с уменьшением разности времён между регистрацией ПД и началом суббури возрастает скорость распространения ПД; в) обнаружено, что в периоды регистрации ПД скорости горизонтальных и вертикальных дрейфов существенно выше фоновых значений.

Шестая глава посвящена: сравнительному анализу результатов модельных экспериментов на модели высокоширотной ионосферы с учётом роли локального электрического поля магнитосферного происхождения и экспериментальных данных при появлении в субполярной ионосфере ПД; оценке роли электрического поля магнитосферного происхождения в формировании узкого провала электронной концентрации в максимуме $F2$ -слоя в вечернем секторе.

Численные эксперименты позволили: а) показать, что узкий провал формируется в области включения электрического поля за счет выноса ионосферной плазмы с вечерней стороны на дневную и наиболее ярко выражен в ранние вечерние часы, когда фоновая концентрация электронов ещё достаточно высока; б) выявить физические причины существования

сезонной зависимости вероятности появления ПД; в) установить, что срывы критической частоты F -области и подъем основания области F обусловлены вертикальными и горизонтальными компонентами скорости дрейфа ионов в полосе ПД.

В *Заключении* суммированы основные результаты диссертационной работы.

V. Новизна проведенных исследований

Заключается в следующем:

- на основе систематизации следов наклонных отражений на ионограммах в высоких широтах предложен, разработан, апробирован и реализован единый подход к обработке и интерпретации ионограмм, позволивший свести всё многообразие следов к четырём основным типам;
- сравнительный анализ совместных случаев спутниковых и наземных измерений позволил доказать, что резкие срывы критических частот на суточных f -графиках ионосферных данных обусловлены появлением ПД, это позволило исследовать морфологию узких провалов по данным ионосферного зондирования;
- определены компоненты скорости дрейфа ионосферной плазмы и построена картина восходящих и нисходящих потоков плазмы в полосе ПД;
- выявлено, что вероятность регистрации СКЧ выше в равноденственные периоды и ниже во время солнцестояния;
- вычислительный эксперимент позволил показать, что узкий провал формируется в области включения электрического поля за счет выноса ионосферной плазмы с вечерней стороны на дневную и уточнить количественно широтный ход электронной плотности в максимуме F_2 -слоя при появлении ПД.

VI. Научная и практическая значимость

Представленные в диссертационной работе научные и научно-технические результаты, могут: а) явиться основой развития технологий, используемых для выявления возмущений «космической погоды», воздействующих на технические средства и системы; б) быть использованы в оперативной оценке условий распространения электромагнитных волн различных радиодиапазонов, учитывающих выявленные особенности динамики полярной стенки ГИП'а и ПД; в) быть использованы в рамках развития моделей краткосрочного прогноза ионосферы (SIMP 2, например).

Тема диссертации тесно связана с научно-техническими и научно-исследовательскими работами, проведенными в рамках плановых госбюджетных тем ИКФИА СО РАН. Часть результатов получена при выполнении грантов РФФИ. Ряд результатов и выводов, полученных в диссертации, был использован в прикладных работах, проводимых ИКФИА СО РАН.

VII. Недостатки работы и замечания

1. В диссертационной работе исследуются явления внутрисуточного масштаба, зарегистрированные на интервале, составляющем несколько 11-ти летних солнечных циклов. За это время магнитный полюс переместился с севера Канады практически к северному географическому полюсу, а структура магнитосферы, включая её нижнюю часть, эволюционировала. В работе этот момент никак не отражен, что вызывает ряд замечаний:

- нет анализа роли эволюции магнитосферы в дисперсии данных по параметрам ПД и ГИП;
- не указано, как эволюция магнитосферы влияет на явление «полной тени» и применима ли модель высокоширотной ионосферы И.А. Голикова, А.Г. Колесника при близкорасположенных магнитном и географическом полюсах;
- нет обоснования насколько используемая модель ионосферы адекватно описывает субполярную ионосферу во время мощных геомагнитных возмущений.

2. Первое защищаемое положение представляется не вполне удачно сформулированным:

- не указано в чём конкретно заключается «*методика определения типов отражений и местоположения ионосферных структур по параметрам и характеристикам следов отражений на ионограммах вертикального и возвратно-наклонного зондирования*»;
- какое количество типов отражений в итоге выявлено и чем они отличаются;
- последнее предложение этого положения «*Накоплен уникальный экспериментальный ионосферный материал по вертикальному и возвратно-наклонному зондированию ионосферы*» носит рекламный характер.

3. Нет упоминания и не обсуждается то, что анализируемые за 13, 15 и 16 марта 1989 года явления были обусловлены одной из самых сильных бурь за всю историю инструментальных геомагнитных наблюдений (стр. 240, 241).

4. В тексте диссертации и автореферата встречаются неудачные выражения, орфографические и синтаксические ошибки. Например, перечисление (стр. 7) заканчивается символом ; вместо точки.

Высказанные замечания не снижают общей положительной оценки выполненного диссертационного исследования и не влияют на высокую научную и практическую значимость представленной работы.

VIII. Достоверность результатов, апробация, публикации

Достоверность результатов и выводов работы обеспечивается весьма значительным объёмом, разнообразием и полнотой данных об исследуемых явлениях, независимыми способами получения исходных данных, использованием физически и математически обоснованных методов их обработки и интерпретации и подтверждается, в том числе, результатами, полученных другими исследовательскими коллективами и авторами в пересекающихся областях.

Положения, выносимые на защиту, находят развернутое и аргументированное подтверждение в тексте диссертационной работы, а также в 84 научных работах, 21 из которых представлена в журналах из списка ВАК (Геомагнетизм и аэрномия – 14, Космические исследования – 5), 10 – в научных журналах, индексируемых в Web of Science и Scopus (Advances in Space Research – 3, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics – 2), 1 коллективной монографии. Основные результаты и выводы по работе доложены и апробированы на российских и международных конференциях и симпозиумах.

В целом диссертационная работа удовлетворяет пунктам 1, 4 Паспорта специальности 1.6.18 – «Науки об атмосфере и климате». Автореферат диссертации в полной мере отражает её содержание.

IX. Заключение

Совокупность представленных в диссертационной работе результатов следует квалифицировать как решение крупной междисциплинарной научной проблемы: *«Исследование в реальных гелиогеофизических условиях фундаментальных закономерностей формирования под воздействием возмущений космической погоды структуры и динамики крупномасштабных неоднородностей субполярной и полярной ионосферы внутрисуточного масштаба, приводящих к снижению качества либо потере связи в КВ и УКВ диапазонах, мобильной связи и спутниковой навигации»*, имеющей важное научное, народнохозяйственное и оборонное значение.

Содержание диссертации, выдвинутые научные положения и сформулированные выводы дают основание считать, что диссертация *А.Е. Степанова «Исследования крупномасштабных структур высокоширотной ионосферы и поляризационного джета по измерениям на якутской цепочке ионозондов и спутниковых наблюдений»*, является научно-квалификационной работой, в которой, на основании выполненных автором исследований, решена важная научная проблема, соответствующая требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», а её автор, *А.Е. Степанов*, заслуживает присуждения искомой степени доктора физико-математических наук.

Нагорский Петр Михайлович,
доктор физ.-мат. наук (специальность 11.00.11 – «охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов»), профессор,
главный научный сотрудник лаборатории физики климатических систем
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск.

Почтовый адрес: 634055, Россия, г. Томск, пр. Академический, 10/3
E-mail: npm_sta@mail.ru тел.: 8-(382)- 249-15-65

Я, Нагорский Петр Михайлович, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.

Гл. научн. сотр. ИМКЭС СО РАН, г. Томск,
доктор физ.-мат. наук, профессор

П.М. Нагорский

Подпись г.н.с. П.М. Нагорского заверяю.

Ученый секретарь ИМКЭС СО РАН,



Канд. техн. наук О.В. Яблокова