

Синевич Александр Алексеевич

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕЛКОМАСШТАБНОЙ СТРУКТУРЫ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ДЖЕТА  
В СУБАВРОРАЛЬНОЙ ИОНОСФЕРЕ СПУТНИКОВЫМИ И НАЗЕМНЫМИ СРЕДСТВАМИ

Специальность 1.3.1 — «Физика космоса, астрономия»

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте Космических Исследований Российской Академии Наук (ИКИ РАН)

<i>Научный руководитель:</i>	<b>Чернышов Александр Александрович</b> кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник отдела физики космической плазмы ИКИ РАН
<i>Официальные оппоненты:</i>	
<i>Ведущая организация:</i>	

Защита состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета 24.1.481.01 при ИКИ РАН, расположенном по адресу: 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная 84/32, подъезд А2 (конференц-зал).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИКИ РАН, <http://www.iki.rssi.ru/diss/>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 117997, Москва, Профсоюзная, 84/32, ученому секретарю диссертационного совета 24.1.481.01.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.1.481.01,  
кандидат физико-математических наук

А. Ю. Ткаченко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования и степень ее разработанности.** Субавроральная область располагается между проекцией по магнитным силовым линиям геомагнитного поля положения плазмопаузы и экваториальной границей аврорального овала. Во время геомагнитной активности положение субавроральной зоны быстро меняется. Здесь наблюдаются процессы и явления, характерные только для этой области околоземного пространства, например, формирование главного ионосферного провала в широтном распределении электронной концентрации; формирование полярной стенки провала за счет высыпания низкоэнергичных электронов на экваториальной границе диффузных вторжений; появление красных дуг в фоновом свечении верхней атмосферы, а также фиолетово-белое свечение и узкие потоки быстрых субавроральных ионных дрейфов к западу вблизи проекции плазмопаузы на высотах области F-слоя ионосферы. Эти потоки получили название **поляризационный джет**, и они наиболее заметно проявляются во время бурь/суббурь на фоне крупномасштабной конвекции плазмы. Скорость плазмы в поляризационном джете может достигать нескольких километров в секунду. Такие высокие скорости плазмы могут влиять на трансionoсферные радиосигналы и приводить к мерцаниям в принимаемом сигнале от навигационных спутников, а также к потере захвата спутниковых сигналов и приводить к серьезному ухудшению радиосвязи.

Комплексные исследования с участием разнообразных космических миссий позволили выявить основные крупномасштабные черты в формировании и развитии поляризационного джета, определить пространственную область, где с максимальной вероятностью появляются субавроральные ионные дрейфы, и время их появления, а также установить их связь с геомагнитными возмущениями и с вторжениями энергичных частиц в ближнюю магнитосферу. Однако многие спутники не были оснащены необходимыми приборами для более глубокого изучения характеристик электромагнитных и плазменных возмущений, наблюдаемых на высотах внешней ионосферы при пролете над субавроральными широтами во время существования поляризационного джета, или научная аппаратура на борту спутников не позволяла проводить измерения с высоким временным разрешением. Мелкомасштабные процессы внутри поляризационного джета практически не исследованы, и здесь остается много открытых вопросов. Ключевые вопросы, связанные с физикой возникновения поляризационного джета и формированием мелкомасштабных структур внутри поляризационного джета, остаются открытыми ввиду отсутствия общепринятой теоретической модели и недостаточной экспериментальной изученности этих процессов. Настоящая диссертационная работа посвящена исследованию мелкомасштабной структуры поляризационного джета и ее влияния на прохождение радиоволн через ионосферу.

**Цели и задачи.** Целью диссертационной работы является комплексное исследование мелкомасштабной структуры поляризационного джета, ее влияния на прохождение радиоволн и анализ зависимости параметров поляризационного джета от геомагнитной активности.

Для достижения этой цели были решены следующие задачи:

— Проанализированы высокочастотные измерения спутника NorSat-1 при пролете через поляризационный джет совместно с одновременными измерениями других спутниковых и наземных средств, что позволило обнаружить внутренние структуры поляризационного джета — страты, а также мелкомасштабные неоднородности параметров плазмы внутри них;

— По высокочастотным данным изучены свойства страт поляризационного джета и мелкомасштабные неоднородности параметров плазмы, высказаны предположения о возможных механизмах их формирования;

— Исследовано влияние поляризационного джета и его внутренней структуры на прохождение радиоволн — сигналов глобальных навигационных спутниковых систем и зондирующего сигнала ионозондов;

— Рассмотрено проявление поляризационного джета во время сильнейших геомагнитных бурь 21 века, в частности во время Бури Победы 10–12 мая 2024 года, и его зависимость его параметров от геомагнитной активности.

**Научная новизна.** Несмотря на наличие большого количества научных работ, посвященных исследованию различных крупномасштабных характеристик поляризационного джета, мелкомасштабная структура поляризационного джета практически не изучена, поскольку многие спутники ранее не были оснащены необходимыми приборами для более глубокого изучения характеристик плазменных возмущений, наблюдаемых на высотах внешней ионосферы при пролете над субавроральными широтами во время существования поляризационного джета или научная аппаратура на борту спутников не позволяла проводить измерения с высоким временным разрешением. В диссертационной работе для исследования поляризационного джета применены различные спутниковые данные, в том числе, впервые использованы данные измерений спутника NorSat-1 с высокой частотой опроса (до 1 кГц), что позволило обнаружить мелкомасштабные неоднородности параметров плазмы внутри поляризационного джета во время геомагнитной активности.

Результаты измерений были проанализированы различными методами анализа данных, среди которых впервые введенный и использованный для исследования поляризационного джета метод  $\Delta N/N$ . Использование данного метода позволило обнаружить новый тип явлений (и ввести в научную литературу термин для его обозначения) — стратифицированный поляризационный джет, состоящий из крупномасштабных и мелкомасштабных страт поляризационного джета. Кроме того, впервые для изучения поляризационного джета использован мультиинструментальный подход — уникальная комбинация большого количества одновременных измерений поляризационного джета спутниковыми и наземными средствами. Это позволило провести комплексное исследование свойств и внутренней структуры поляризационного джета, а также впервые определить влияние поляризационного джета, его страт и мелкомасштабных неоднородностей поляризационного джета на прохождение радиосигналов, в том числе сигналов глобальных систем спутниковой навигации. Впервые продемонстрировано, что провал электронной концентрации, связанный с развитием поляризационного джета в субавроральной ионосфере, наблюдается на локальных картах полного электронного содержания.

В мае 2024 года была зарегистрирована экстремальная геомагнитная буря ( $Dst = -412$  нТл), представляющая большой интерес для фундаментальных исследований процессов в ионосфере. В диссертационной работе по спутниковым данным впервые изучена динамика поляризационного джета во время этого события. На ионограммах поляризационный джет проявлялся в виде характерных U-образных структур, появление которых коррелировало с ростом индекса, характеризующего вариации полного электронного содержания. Сравнение с параметрами поляризационного джета во время других экстремальных геомагнитных событий показало, что скорость поляризационного джета во время сильнейших геомагнитных бурь в среднем ниже, чем во время умеренной геомагнитной активности.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Поскольку поляризационный джет представляет собой узкий сверхзвуковой поток плазмы, следует ожидать образования в нем мелкомасштабных неоднородностей, вызванных различными плазменными неустойчивостями. Теоретическая значимость работы заключается в определении новых, ранее неизвестных характеристик поляризационного джета и его внутренней мелкомасштабной структуры, что позволяет улучшить понимание процессов в субавроральной области ионосферы и магнитосферы, а также актуализировать текущие теории генерации поляризационного джета. Кроме того, результаты диссертационной работы дают возможность уточнения математических моделей как поляризационного джета, так и ионосферы в целом.

Физические явления, происходящие в субавроральной ионосферной плазме, влияют на распространение радиоволн, в частности, на традиционную длинноволновую радиосвязь. Падение плотности ионосферной плазмы внутри поляризационного джета существенно влияет на условия прохождения коротковолнового радиоизлучения, что, в свою очередь, влияет на точность позиционирования навигационных спутников (GPS, ГЛОНАСС, Galileo и др.). Сложная внутренняя структура поляризационного джета, учитывая возможную комбинацию таких факторов как понижение концентрации электронов и ионов, рост их температуры, сильный

ионный дрейф, а также вызываемые ими химические процессы, могут вызывать различные искажения, переотражения и потери проходящих через поляризационный джет радиосигналов. В практических приложениях во время геомагнитных возмущений необходимо учитывать не только высыпание заряженных частиц в авроральном овале, но и развитие поляризационного джета в субавроральной зоне. Таким образом, исследование внутренней мелкомасштабной структуры поляризационного джета важно как для фундаментальной науки, так и для практических применений.

**Методология и методы исследования.** В диссертационной работе помимо прямого наблюдения временной и пространственной эволюции измеренных и рассчитанных параметров плазмы в поляризационном джете использовались такие стандартные и верифицированные методы анализа спутниковых и наземных данных как Фурье- и вейвлет-анализ, ROTI (Rate of change of TEC Index), построение карт ПЭС (Полное Электронное Содержание), сцинтилляционные индексы  $S4$  и  $\sigma_f$ , анализ отражений сигналов на ионограммах. Также впервые для анализа параметров поляризационного джета использованы методы RODI (Rate of change of Density Index) и  $\Delta N/N$ . Подробное описание расчетов плазменных параметров представлено в разделе 1.2 «Спутниковые инструменты», а подробное описание методов анализа данных — в последующих разделах диссертационной работы. В ходе проведения расчетов применялась программная среда MATLAB и язык программирования Python.

#### **Положения, выносимые на защиту.**

1. Впервые внутри поляризационного джета обнаружены неоднородности температуры и концентрации электронов с пространственными размерами вплоть до сотен метров. Установлено, что с развитием геомагнитной активности флуктуации параметров плазмы внутри поляризационного джета увеличиваются на всех масштабах, при этом возрастает роль крупномасштабных неоднородностей;

2. Обнаружено новое явление — стратифицированный поляризационный джет, состоящий из 2–4 крупных страт размером  $0.2^\circ$ – $0.3^\circ$  широты и нескольких мелких страт, имеющих размер  $<0.1^\circ$ . Страты электронной температуры не всегда пространственно совпадают со стратами электронной концентрации и иногда сдвинуты по широте. Показано, что неоднородности температуры электронов внутри страт поляризационного джета более выражены, чем неоднородности электронной концентрации;

3. Установлено, что поляризационный джет оказывает влияние на прохождение трансионосферного сигнала глобальных навигационных спутниковых систем, вызывая увеличение амплитудных и фазовых сцинтилляций, а также потерю захвата навигационного радиосигнала. Показано, что множественные переотражения радиосигнала, наблюдаемые в виде F-рассеяния на ионограммах во время развития поляризационного джета, обусловлены стратами и мелкомасштабными плазменными неоднородностями поляризационного джета;

4. Показано, что во время экстремальной геомагнитной бури в мае 2024 года ( $Dst = -412$  нТл) скорость поляризационного джета ниже, чем во время умеренных магнитных возмущений. Это связано с особенностями развития данного экстремального события, приводящими к нарушениям механизмов генерации поляризационного джета вследствие подвижности плазмопаузы/аврорального овала, что не позволяет сформировать устойчивый западный дрейф плазмы.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием широкого набора данных с различных наземных и спутниковых измерительных средств, как новых, так и уже зарекомендованных в других исследованиях. Применяются измерения широко известных, откалиброванных и многократно проверенных научных инструментов как на борту космических аппаратов миссий Swarm, DMSP, NorSat-1, так и наземной инфраструктуры (ионозонды, приемники сигналов глобальных навигационных спутниковых систем, радары, магнитометры). Достоверность определяется использованием современных методов анализа данных и сопоставление результатов с

предсказаниями теории, а также согласием с результатами, опубликованными ранее в научной литературе.

Результаты работы докладывались автором на российских и международных научных конференциях:

— Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования», ИКИ РАН (Москва: **2020, 2021, 2022, 2023, 2024, 2025, 2026**);

— Ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе», ИКИ РАН (Москва: **2021, 2022, 2023, 2024, 2025, 2026**);

— Ежегодный Апатитский семинар «Физика авроральных явлений», (Апатиты: **2021, 2022, 2023, 2024, 2025, 2026**);

— International Conference «Atmosphere, Ionosphere, Safety» (AIS), КФ ИЗМИРАН (Калининград: **2023, 2025**);

— Всероссийская школа Национального центра физики и математики по экспериментальной и лабораторной астрофизике и геофизике, ИЦФМ (Саров: **2024, 2025**);

— ISEE Symposium PWING-ERG Conference and school on the inner magnetosphere. ISEE, Nagoya University (Япония, Нагоя, **2021**);

— Проект ASTRA — The Arctic Space Training Workshop (Турция, Стамбул, **2022**; Норвегия, Осло, **2022**);

— Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике «Физические процессы в космосе и околоземной среде» Конференция молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом» (Иркутск, **2024**);

— Всероссийская Школа-конференция молодых астрономов «Космос, Астрофизика, Солнце, Планеты» — КАСП (Троицк, Москва, **2025**);

— Международная конференция Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений (с. Паратунка, Камчатский край, **2025**).

**Личный вклад автора.** Все результаты, представленные в настоящей работе, получены соискателем лично, либо совместно с соавторами. Положения, выносимые на защиту, основаны на работах из списка публикаций автора по теме диссертации, вклад автора в которые является основным. Результаты, представленные в диссертации, согласованы с соавторами.

**Публикации.** Результаты, изложенные в диссертации, представлены в 11 научных статьях, опубликованных в журналах, рекомендованных ВАК и индексируемых WoS и Scopus: «Geophysical Research Letters» (WoS Q1, Scopus Q1) — 1 статья, «Journal of Geophysical Research: Space Physics» (WoS Q2, Scopus Q1) — 2 статьи, «Scientific Reports» (WoS Q1, Scopus Q1) — 1 статья, «Advances in Space Research» (WoS Q1, Scopus Q1) — 2 статьи, «Russian Journal of Earth Sciences» (WoS Q4, Scopus Q3) — 1 статья, «Известия РАН. Серия физическая» (Scopus Q3) — 1 статья, «Геомагнетизм и аэрономия» (Scopus Q3) — 1 статья, «Космические исследования» (WoS Q4, Scopus Q4) — 1 статья, «Солнечно-земная физика» (WoS Q4, Scopus Q4) — 1 статья. Ссылки на статьи приведены в разделе «Публикации автора по теме диссертации».

**Объем и структура диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, словаря терминов и списка литературы, состоящего из 260 наименований. Полный объем диссертации составляет 184 страницы, включая 67 рисунков и две таблицы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обосновывается актуальность темы и степень ее разработки, формулируются цели и задачи работы, обосновывается научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, приводится краткое описание методологии исследования. Приводятся положения, выносимые на защиту, описываются степень достоверности и апробация полученных результатов, личный вклад автора, количество публикаций и объем диссертационной работы.

В первой Главе приведены результаты исследования внутренней мелкомасштабной структуры поляризационного джета по высокочастотным измерениям. В разделе 1.1 «Введение» представлен широкий анализ научной литературы, посвященной поляризационному джету, в частности, его характеристикам и предполагаемым механизмам возникновения. Впервые поляризационный джет был обнаружен по измерениям советского спутника «Космос-184» (Гальперин и др., 1973а) (Рисунок 1).

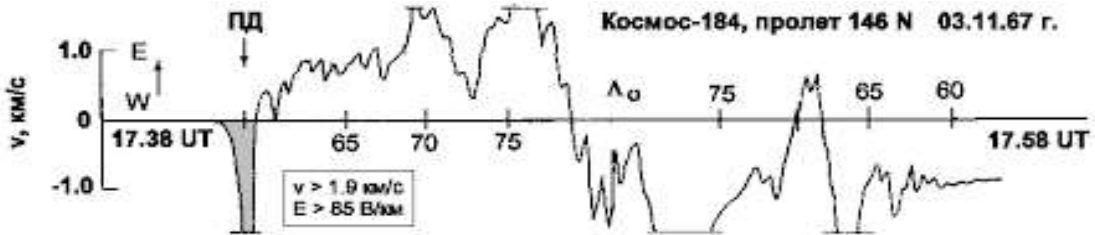


Рисунок 1 — Первый случай регистрации ПД по данным спутника «Космос-184». ПД выделен серым цветом (Гальперин и др., 1973а).

Данное явление было интерпретировано в статье (Гальперин и др., 1973б) как результат появления электрических полей (дрейф  $E \times B$ ) поляризации при разделении за счет градиентного дрейфа положительно и отрицательно заряженных энергичных частиц плазменного слоя во время суббури:

$$v_E = \frac{E \times B}{B^2}. \quad (1)$$

В англоязычной литературе за этим явлением закрепилось другое определение — «субавроральный ионный дрейф» — SAID (Subauroral Ion Drift) после работы (Spiro et al., 1979), где узкие потоки ионных дрейфов изучались по данным американского спутника Atmosphere Explorer C. В результате исследования определено, что ПД возникает от 18 до 02 MLT экваториальнее границы авроральной зоны между  $55^\circ$  и  $70^\circ$  геомагнитной широтой и частота его появления зависит от геомагнитной активности. В дальнейшем было проведено множество спутниковых и наземных исследований, в которых были определены крупномасштабные характеристики поляризационного джета. Также было предложено несколько механизмов генерации — теорий, описывающих физику возникновения поляризационного джета. Основные из них на сегодняшний день — «генератор напряжения», «генератор тока» и «короткое замыкание». Механизм «генератора напряжения» был первым из предложенных и представлен в статье (Southwood, Wolf, 1978) и затем доработан в (Galperin, 2002). Согласно ему высыпавшиеся из хвоста магнитосферы энергичные ионы проникают на более низкие L-оболочки из-за сохранения первых двух адиабатических инвариант в присутствии утро-вечерней компоненты электрического поля вдоль траектории. Таким образом, получается, что ионы заходят глубже, чем электроны, что создает электрическое поле наружу от Земли:

$$E_L = - \left( 1 + \left( \frac{L_2}{L} \right)^2 \right) C e^{i\phi}, \quad (2)$$

при  $L_2 < L < L_1$ , где  $L_1$  — L-оболочка области авроральной проводимости,  $L_2$  — L-оболочка внутреннего края кольцевого тока:

$$E_L \approx -2C e^{i\phi}, \quad (3)$$

$$C \sim \frac{2\Sigma_{p2}(-iE)}{(\Sigma_{p1} + i\Sigma_{h12})(1 - L_2^2 L_1^{-2})}, \quad (4)$$

где  $\Sigma_{p1}$  — авроральная проводимость Педерсена;  $\Sigma_{p2}$  — проводимость Педерсена внутреннего края кольцевого тока;  $\Sigma_{h12} = \Sigma_{h1} - \Sigma_{h2}$ ;  $\Sigma_{h1}$  — авроральная проводимость Холла;  $\Sigma_{h2}$  — проводимость Холла внутреннего края кольцевого тока.

Проекция поля  $E_L$  вдоль силовых линий на ионосферу дает направление поля к полюсу. Это электрическое поле создает электрический дрейф ( $E \times B$ ), направленный на запад как в северном, так и в южном полушарии.

Механизм «генератора тока» предложен в (Anderson et al., 1993). Нисходящие ( $R_2, J_{\parallel}^{\downarrow}$ ) зоны «2» и восходящие ( $R_1, J_{\parallel}^{\uparrow}$ ) зоны «1» продольные токи замыкаются в ионосфере током Педерсена.

Токи FAC R2 высыпают ионы экваториальнее электронов в около-полуночном секторе MLT низкопроводящей субавроральной ионосферы. Эти токи замыкаются в высокоширотной ионосфере с помощью текущих в сторону полюса токов Педерсена. Согласно уравнению непрерывности тока  $E_x \propto J_{\parallel}^{\downarrow} \Sigma_P$ , где  $\Sigma_P$  — проводимость Педерсена. Таким образом наибольшее поле образуется в точке наименьшей проводимости. При столкновении ионов с нейтральными частицами атмосферы ионы разогреваются (Джоулев нагрев), чем вызывают ускорение химических процессов и рекомбинации в данной области (внутри ГИП), что, в свою очередь, снижает локальную плотность плазмы.

В (Mishin, Puhl-Quinn, 2007) взамен указанным выше механизмам предлагается механизм, называемый «короткое замыкание». Поток горячей плазмы (плазмоид) после пересоединения в хвосте магнитосферы с плотностью  $n_h$  и температурой  $T_h$ , движущийся поперек магнитного поля  $B$ , может поддерживать свое движение к Земле со скоростью  $V$ , даже если

$$n_h(T_h + m_h V^2) \ll B^2/8\pi. \quad (5)$$

Поскольку ионы продвигаются глубже электронов, из-за разделения зарядов возникает электрическое поле, противоположное движению плазмоида. Эта модель предполагает, что окружающая плазма разрежена и не может поддерживать электрические токи, достаточно большие для уменьшения поляризации, то есть для короткого замыкания.

Эффект короткого замыкания незначителен до тех пор, пока параметр

$$A = \frac{n_h}{n_0} \quad (6)$$

превышает критический параметр  $A_c$ :

$$A_c = \frac{n_h}{n_c} \simeq \sqrt{\frac{4m_i V}{mva}}, \quad (7)$$

где  $a$  — размерность вектора  $Y$  (к Земле);  $m_i$  — масса холодных ионов.

При движении плазмоида к Земле концентрация плазмы резко возрастает на плазмопаузе, и  $A$  приближается к  $A_c$ , после чего возникает короткое замыкание электрического поля через плазмосферу и ионосферу вдоль поля  $B$ . Поскольку короткое замыкание — инерционный процесс, то при постоянном движении плазмоида устанавливается стационарное состояние, при котором закорачиваться успевают только заряды, проникшие наиболее глубоко в плазмосферу. Таким образом возникает резкий градиент потенциала в узком слое на внутренней стороне плазмопаузы. Электрическое поле этого слоя проецируется на ионосферу в виде полосы ПД. Этот узкий слой впоследствии в работе (Mishin et al., 2010) был назван «турбулентный плазмосферный пограничный слой» (TPBL, Turbulent Plasmaspheric Boundary Layer).

Раздел 1.2 «Спутниковые инструменты» посвящен спутниковым миссиям, данные которых использованы в работе, а также установленным на них измерительным приборам, принципам их действия и методам расчета плазменных параметров. 14 июля 2017 года с космодрома Байконур на солнечно-синхронную орбиту с наклоном  $98^\circ$  и высотой  $\sim 600$  км был запущен первый норвежский научный микроспутник NorSat-1, на котором установлен разработанный в Университете Осло multi-needle Langmuir probe (m-NLP) — многоигольная система зондов Ленгмюра, которому посвящена статья (Hoang et al., 2018). Особенностью данного прибора является высокая частота опроса — 1 кГц, позволяющая производить измерения параметров плазмы с высоким временным и пространственным разрешением. Классический (например, сферический) зонд Ленгмюра производит измерения на диапазоне напряжений, строя вольтамперную характеристику, из которой вычисляются параметры плазмы. Поскольку охват (развертка) всего диапазона занимает время, временное разрешение получаемых плазменных параметров, как правило, невысоко, что затрудняет исследование мелкомасштабных плазменных структур. m-NLP, установленная на NorSat-1, представляет собой четыре цилиндра (иглы), находящиеся под разными фиксированными напряжениями в области электронного насыщения вольтамперной характеристики. Отсутствие необходимости охватывать диапазон напряжений обеспечивает возможность измерять ток электронов с гораздо большей частотой, что позволяет получить высокочастотные характеристики плазмы. Ток

насыщения электронов цилиндрического зонда с радиусом много меньше дебаевского радиуса экранирования определяется теорией приближения ограниченного орбитального движения (OML, orbital motion limited), разработанной Мотт-Смитом и Ленгмюром в 1926 году (Mott-Smith, Langmuir, 1926):

$$I_c = N_e A e \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{k_b T_e}{2\pi m_e}} \sqrt{1 + \frac{eV}{k_b T_e}}, \quad (8)$$

где  $N_e$  — концентрация электронов;  $k_b$  — постоянная Больцмана;  $T_e$  — температура электронов;  $e$  — заряд электрона;  $A$  — площадь поверхности зонда;  $m_e$  — масса электрона;  $V$  — потенциал зонда по отношению к потенциалу плазмы.

На высоте орбиты NorSat-1 все три предположения теории обычно выполняются (Jacobsen et al., 2010), поскольку тепловая скорость электронов намного больше скорости космического аппарата относительно плазмы, длина свободного пробега электронов намного больше как радиуса зонда, так и масштабной длины распределения электрического потенциала вокруг зонда и радиус Лармора намного больше радиуса зонда. Для определения концентрации электронов  $N_e$  метод измерения m-NLP (Рисунок 2) использует, по меньшей мере, два цилиндрических зонда, работающих при различных фиксированных напряжениях:

$$N_e = \frac{1}{KA} \sqrt{\frac{\Delta(I_c)^2}{\Delta V_b}}, \quad (9)$$

где  $K$  — константа, равная  $\frac{e^{3/2}}{\pi} \sqrt{\frac{2}{m_e}}$ ;  $\Delta(I_c)^2$  — разность квадратов собранных токов;  $\Delta V_b$  — разность в напряжениях зондов.

Температура в этом случае определяется следующим образом:

$$\frac{k_b T_e}{e} = \frac{R(V_s + V_{p2}) - (V_s + V_{p1})}{1 - R}, \quad (10)$$

где  $R$  — отношение квадратов токов двух зондов с разными потенциалами.

Помимо высокочастотных данных спутника NorSat-1 в текущей работе используются измерения сферического зонда Ленгмюра на спутниках миссии Swarm, а также измерения дрейфметра (измеряющих скорость дрейфа ионов) и УФ-спектрографа SSUSI на борту спутников DMSP.

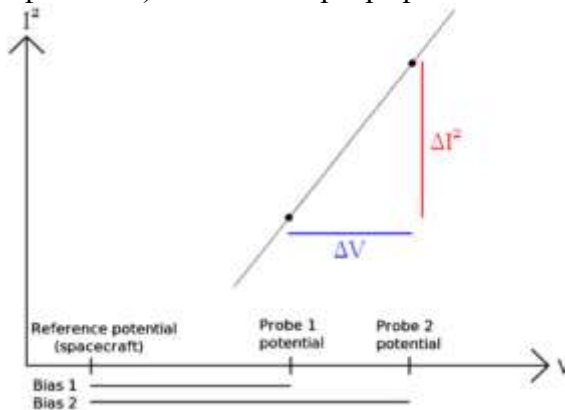


Рисунок 2 — Метод измерения многоигольной системы зондов Ленгмюра (Jacobsen et al., 2010).

Использование уникальных измерений многоигольного зонда Ленгмюра с рекордно высокой пространственной частотой опроса на спутнике NorSat-1 позволило впервые подробно проанализировать внутреннюю мелкомасштабную структуру поляризационного джета во время средней геомагнитной активности 20 апреля 2018 года и сравнить измерения спутника NorSat-1 с измерениями спутников Swarm. Результаты этого анализа представлены в разделе 1.3 «Поляризационный джет 20 апреля 2018 года», а их обсуждение — в разделе 1.4 «Выводы».

На Рисунке 3 представлены измеренные m-NLP на борту спутника NorSat-1 значения электронной температуры и концентрации при движении из северной полярной шапки в сторону экватора при пересечении поляризационного джета в геомагнитных координатах. Экваториальнее

участка, отмеченного красной стрелкой, простирается область, со стороны экватора ограниченная небольшим подъемом электронной концентрации (показан синей стрелкой) на  $52.2^\circ$  геомагнитной широты (10:11:44 UT). Внутри данной области присутствует несколько участков, на которых заметны повышения электронной температуры в  $\sim 1.2$  раза и соответствующие им возрастания спектральной интенсивности на частотах до  $\sim 250$  Гц (средняя панель). Поскольку размер данной области по широте составляет  $1.1^\circ$ , что является типичным размером поляризационного джета ( $1^\circ - 2^\circ$ ), целесообразно предположить, что вся эта область является поляризационным джетом. В таком случае, наличие нескольких узких участков пониженной электронной концентрации, совпадающих с повышением электронной температуры, позволяет предположить, что внутри поляризационного джета неоднороден и, возможно, состоит из страт. Поскольку поляризационный джет сопровождается сильным меридиональным дрейфом со скоростью, превышающей скорость звука, то следует ожидать образования в нем мелкомасштабных плазменных неоднородностей, вызванных различными неустойчивостями. Для их обнаружения на средней и нижней панели представлены спектрограммы температуры и концентрации электронов соответственно, полученные с помощью дискретного преобразования Фурье неусредненных спутниковых данных. Спектрограммы показывают повышение спектральной интенсивности температуры электронов на частотах до  $\sim 300$  Гц и концентрации электронов на частотах до  $\sim 100$  Гц. По данным спектрограммам можно сделать вывод о наличии мелкомасштабных неоднородностей температуры внутри ПД с пространственными размерами до сотен метров.

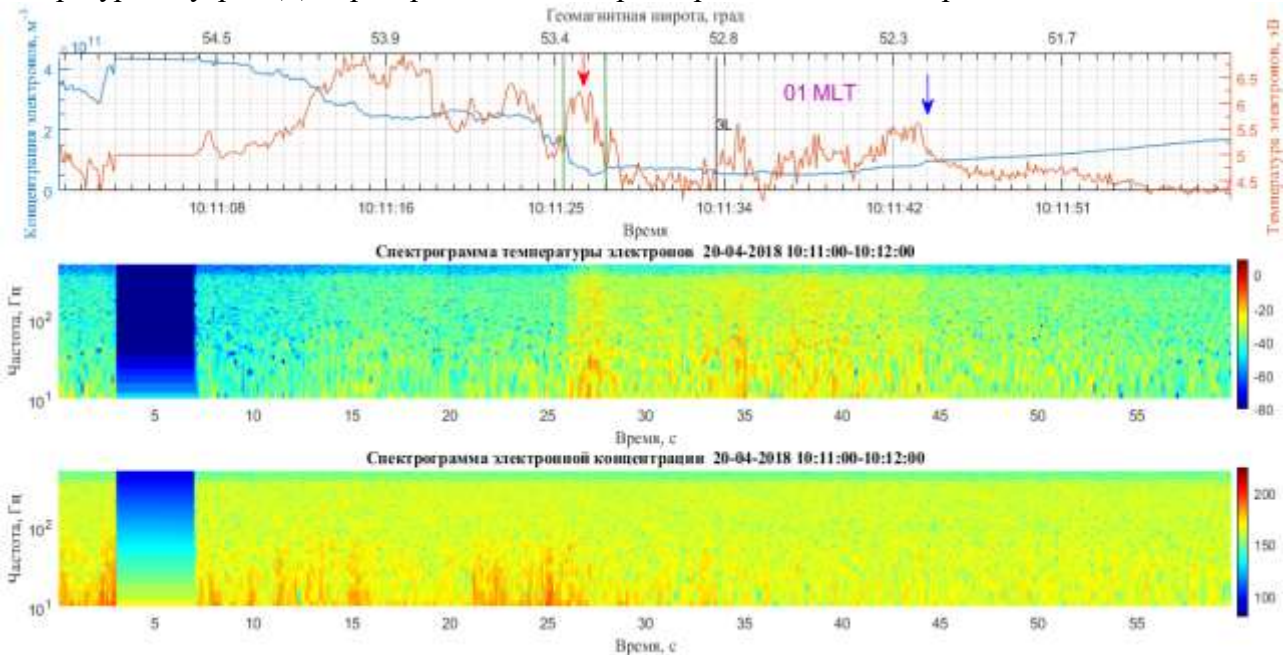


Рисунок 3 — Значения концентрации (синяя линия) и температуры (красная линия) электронов и их спектрограммы, измеренные NorSat-1 во время пролета в 10 UT 20 апреля 2018 года. Красная стрелка и зеленые вертикальные линии — наиболее глубокая часть у полярной стенки субаврорального провала электронной концентрации. Синей стрелкой отмечена экваториальная граница провала электронной концентрации.

Для более подробного исследования динамики развития ПД и его пространственной структуры, а также для подтверждения результатов, полученных по данным спутника NorSat-1, необходимо сравнить их с результатами, полученными на другом спутнике, например на спутнике Swarm C, который в рассматриваемый момент времени пролетал близко к спутнику NorSat-1. На Рисунке 4 представлено сравнение изменений концентрации и температуры электронов по наблюдениям спутников NorSat-1 (Рисунок 4а) и Swarm C (Рисунок 4б) во время совместного пролета. Оба спутника в момент этого пролета находились в северном полушарии и летели от полюса к экватору в секторах  $\sim 01$  и  $\sim 02$  MLT для NorSat-1 и Swarm C соответственно, а по времени UT пролет NorSat-1 в показанной области отстает от пролета Swarm C на  $\sim 6$  минут. Подъемы температуры внутри поляризационного джета, измеренные спутником Swarm C с

частотой опроса 2 Гц, схожи по размерам и местоположению с провалами концентрации внутри поляризационного джета, измеренными спутником NorSat-1 с частотой опроса 1 кГц. Тот факт, что поведение температуры и концентрации электронов по данным спутника NorSat-1 хорошо соответствует поведению этих параметров по наблюдениям Swarm C, говорит о том, что измерения на обоих спутниках являются в достаточной мере корректными и обнаруженные неоднородности не являются локальными. Наоборот, они вытянуты вдоль широты как минимум на 2 часа MLT (разница в долготе между пролетами NorSat-1 и Swarm C).

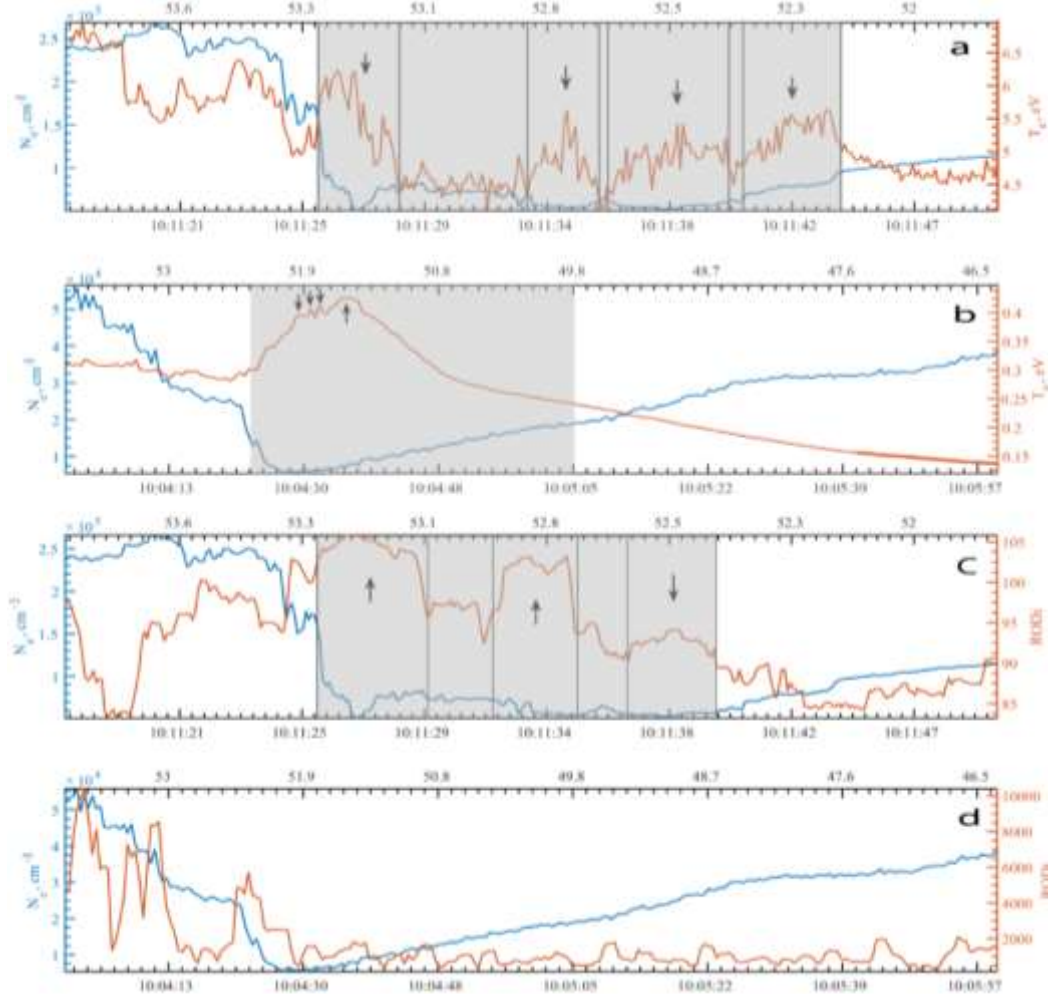


Рисунок 4 — Изменение температуры и электронной концентрации во время пролета NorSat-1 (a) и пролета Swarm C (b). Эволюция индекса скорости изменения концентрации (RODI) и электронной концентрации во время пролета NorSat-1 (c) и пролета Swarm C (d). Серые области выделяют положение ПД. Стрелки указывают на небольшие пики температуры (a, b) и RODI (c), которые можно интерпретировать как страты ПД.

Для детального анализа мелкомасштабных неоднородностей был использован индекс скорости изменения плотности (Rate of Change of Density Index, RODI). RODI — это параметр, отражающий структурированность плазмы в заданном интервале и представляющий собой стандартное отклонение скорости изменения плотности (Rate of Change of Density, ROD) в скользящем окне:

$$RODI(t) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{t_i=t+\frac{\Delta t}{2}}^{t_i=t+\frac{\Delta t}{2}} |ROD(t_i) - \overline{ROD}|^2}, \quad (11)$$

где  $\overline{ROD}$  — это среднее от  $ROD(t_i)$ :

$$\overline{ROD} = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{t_i=t-\frac{\Delta t}{2}}^{t_i=t+\frac{\Delta t}{2}} ROD(t_i)}. \quad (12)$$

ROD определяется как производная по времени от электронной концентрации:

$$ROD(t) = \frac{N_e(t + \Delta t) - N_e(t)}{\Delta t}. \quad (13)$$

Рисунки 4с и 4d иллюстрируют сравнение эволюции электронной концентрации и RODI за 0.1 с для NorSat-1 и за 2 с для Swarm C. Четыре повышения RODI (три ярко выраженных на  $\sim 53.2^\circ$ ,  $\sim 52.8^\circ$  и  $\sim 52.5^\circ$ , которые указаны здесь стрелками, и одно слабо выраженное на  $\sim 52.3^\circ$  геомагнитной широты), совпадающие с локальными провалами электронной концентрации, соответствуют четырем повышениям электронной температуры на Рисунке 4а. Рост RODI указывает на наличие мелкомасштабных неоднородностей/градиентов электронной концентрации в стратах внутри поляризационного джета согласно данным NorSat-1. По данным Swarm C с помощью RODI не удастся обнаружить мелкомасштабные неоднородности электронной концентрации из-за недостаточной частоты дискретизации зонда Ленгмюра на борту Swarm C.

Помимо сравнения данных измерений спутников NorSat-1 и Swarm было произведено также сравнение Фурье-спектров измеренной электронной концентрации во время пяти последовательных пересечений поляризационного джета, а также во время «геомагнитно-спокойного» пролета для сравнения. Наклоны построенных спектров сведены в Таблицу 1:

Таблица 1 — Наклоны спектров электронной концентрации NorSat-1 и Swarm C.

Пролет	Наклон спектра NorSat-1	Наклон спектра Swarm C
Первый	$1.94 \pm 0.02$	$1.89 \pm 0.09$
Второй	$1.93 \pm 0.01$	$1.57 \pm 0.15$
Третий	$1.89 \pm 0.02$	$1.93 \pm 0.14$
Четвертый	$1.84 \pm 0.03$	$1.78 \pm 0.10$
Пятый	$1.80 \pm 0.03$	$1.61 \pm 0.08$
«Спокойный»	$1.88 \pm 0.03$	$1.64 \pm 0.08$

Поскольку с увеличением номера пролета 20 апреля 2018 года геомагнитная активность снижалась, можно прийти к выводу, что с уменьшением геомагнитной активности наклон спектра электронной концентрации внутри поляризационного джета уменьшается. Другими словами, по мере развития геомагнитной активности возрастает роль крупномасштабных эффектов в поляризационном джете. С развитием геомагнитной активности происходит также увеличение флуктуаций плотности плазмы на всех масштабах.

Во **второй Главе** приведены результаты продолжения исследования мелкомасштабной структуры поляризационного джета по высокочастотным измерениям, но с использованием как более широкого набора дополнительных источников данных и методов анализа, так и большего набора геомагнитных событий. В разделе 2.1 «Введение» перечислены научные статьи, в которых описаны ранние попытки исследователей изучить внутреннюю структуру ионных дрейфов в субавроральной ионосфере. Эти работы посвящены SAPS (SubAuroral Polarization Stream) — субавроральному поляризационному потоку, который представляет собой широкий участок субавроральных широт с западными ионными дрейфами, включает в себя поляризационный джет и, вероятно, имеет схожую с ним природу (Foster, Burke, 2002). Внутренняя структура поляризационного джета до текущей диссертационной работы исследована не была. В разделе 2.2 «Методы анализа мелкомасштабных свойств» представлены результаты анализа высокочастотных данных спутника NorSat-1 двумя разными методами —  $\Delta N/N$  и вейвлет-преобразованием, а в разделе 2.3 «Выводы» — обсуждение полученных результатов. Метод  $\Delta N/N$  показывает отклонение  $N$  от среднего значения на разных масштабах:

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{N - SMA(N)}{SMA(N)}, \quad (14)$$

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{T - SMA(T)}{SMA(T)}, \quad (15)$$

где SMA — простое скользящее среднее. Используя этот параметр, можно обнаружить неоднородности параметров плазмы и определить их пространственные размеры. В данном исследовании параметр  $\Delta N/N$  рассчитывается отдельно для каждого окна скользящего среднего с пространственными размерами от  $0.01^\circ$  широты до  $1^\circ$  с шагом  $0.01$ . Рисунок параметров  $\Delta N/N$  или  $\Delta T/T$  построен следующим образом: по оси абсцисс отложена геомагнитная широта, по оси ординат — окно скользящего среднего ( $\Delta$ ), а значение  $\Delta N/N$  или  $\Delta T/T$  представлено в виде цветовой шкалы. Кроме того, были применены методы фильтрации высокочастотных и высокоинтенсивных шумов. Согласно Рисунку 5, наибольший пик температуры (красная линия) пространственно совпадает с наиболее глубоким провалом электронной концентрации (синяя линия). Кроме того, в сторону экватора от полярной стенки заметны еще два провала электронной концентрации, совпадающие с ростом электронной температуры, на геомагнитных широтах  $55.9^\circ$ – $55.6^\circ$  и  $55.1^\circ$ – $54.8^\circ$ . Внутри стратифицированного поляризационного джета на Рисунке 5 параметры  $\Delta N/N$  и  $\Delta T/T$  подтверждают наличие четырех различных страт ПД электронной температуры и концентрации на геомагнитных широтах  $56.3^\circ$ – $56^\circ$ ,  $55.9^\circ$ – $55.6^\circ$ ,  $55.3^\circ$ – $5.4^\circ$  и  $55^\circ$ – $54.8^\circ$ , шириной в  $0.3^\circ$ ,  $0.3^\circ$ ,  $0.1^\circ$  и  $0.2^\circ$  широты соответственно. Вторая от полярной стенки страта поляризационного джета, в свою очередь, состоит из нескольких небольших страт размером  $<0.1^\circ$  широты.

Помимо метода  $\Delta N/N$  в рамках второй Главы диссертационной работы для исследования страт поляризационного джета и мелкомасштабных неоднородностей внутри них был использован вейвлет-анализ. В качестве базисной вейвлет-функции здесь используется вейвлет-функция Хаара (часто рассматривается как частный случай вейвлета Добеши первого порядка). Вейвлеты Хаара ортогональны, обладают компактным носителем, хорошо локализованы в пространстве и не являются гладкими:

$$\psi(x) = \begin{cases} 1, & 0 \leq x < 1/2 \\ -1, & 1/2 \leq x < 1. \\ 0, & x \notin (0, 1) \end{cases} \quad (16)$$

Вейвлет Хаара оптимален для описания резких изменений в сигнале, когда имеются градиенты и разрывы в значениях, а также в задачах поиска экстремумов сигнала.

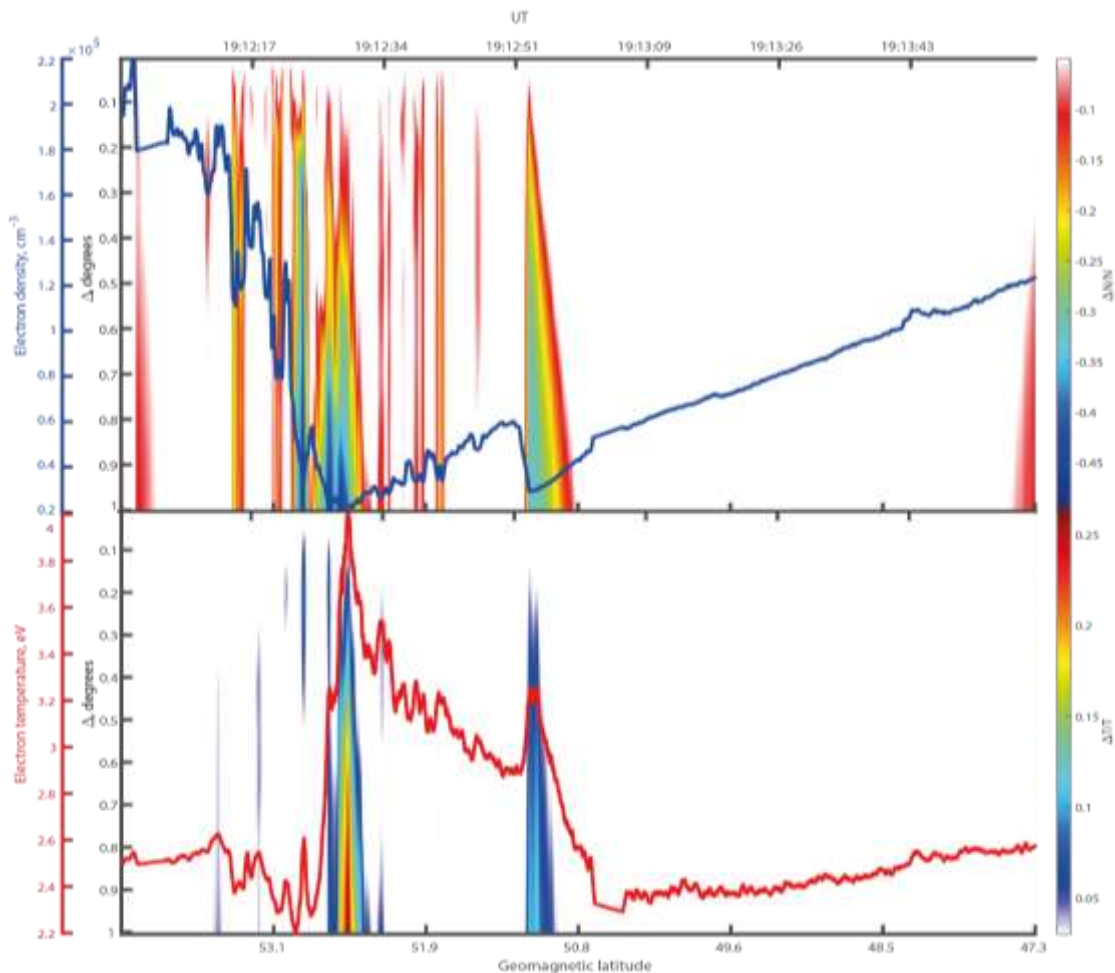


Рисунок 5 — Верхняя панель — Динамика горизонтальной (красная линия на верхнем графике) и вертикальной (фиолетовая линия на верхнем графике) скоростей дрейфа ионов, электронной концентрации (синяя линия на верхнем графике), температуры ионов (красная линия на нижнем графике) и электронов (синяя линия на нижнем графике) в зависимости от геомагнитной широты (верхняя ось абсцисс), времени UT (нижняя ось абсцисс) и MLT (фиолетовая линия на нижнем графике) по данным DMSP F-18 на 19 UT 18 марта 2018 года. Средняя и нижняя панели — изменение концентрации (синяя линия) и температуры (красная линия) электронов и параметров  $\Delta N/N$  (цвет на средней панели) и  $\Delta T/T$  (цвет на нижней панели) по данным NorSat-1 на 19 UT 18 марта 2018 года.

На верхней панели Рисунка 6 располагается широкий (от  $60^\circ$  до  $57.5^\circ$  геомагнитной широты) провал электронной концентрации. Поляризационный джет во время данного геомагнитного события находится в нижней точке главного ионосферного провала и совпадает с подъемом электронной температуры на участке геомагнитных широт  $58.74^\circ$ – $58.16^\circ$ , внутри которого заметно три участка падения концентрации, совпадающих с ростом электронной температуры и являющихся крупными стратами поляризационного джета, на  $58.74^\circ$ – $58.48^\circ$ ,  $58.48^\circ$ – $58.32^\circ$  и  $58.32^\circ$ – $58.17^\circ$  геомагнитных широтах. На средней панели наблюдается множество участков неоднородностей электронной концентрации и температуры, большое количество из которых отражает наличие мелкомасштабных неоднородностей в главном ионосферном провале. Внутри стратифицированного поляризационного джета пространственный размер неоднородностей электронной концентрации достигает десятков сотен метров. На нижней панели Рисунка 6 по спектрограмме вейвлет-преобразования электронной температуры наблюдается наличие около десятка мелких страт поляризационного джета, минимальный пространственный размер неоднородностей в которых составляет сотни метров.

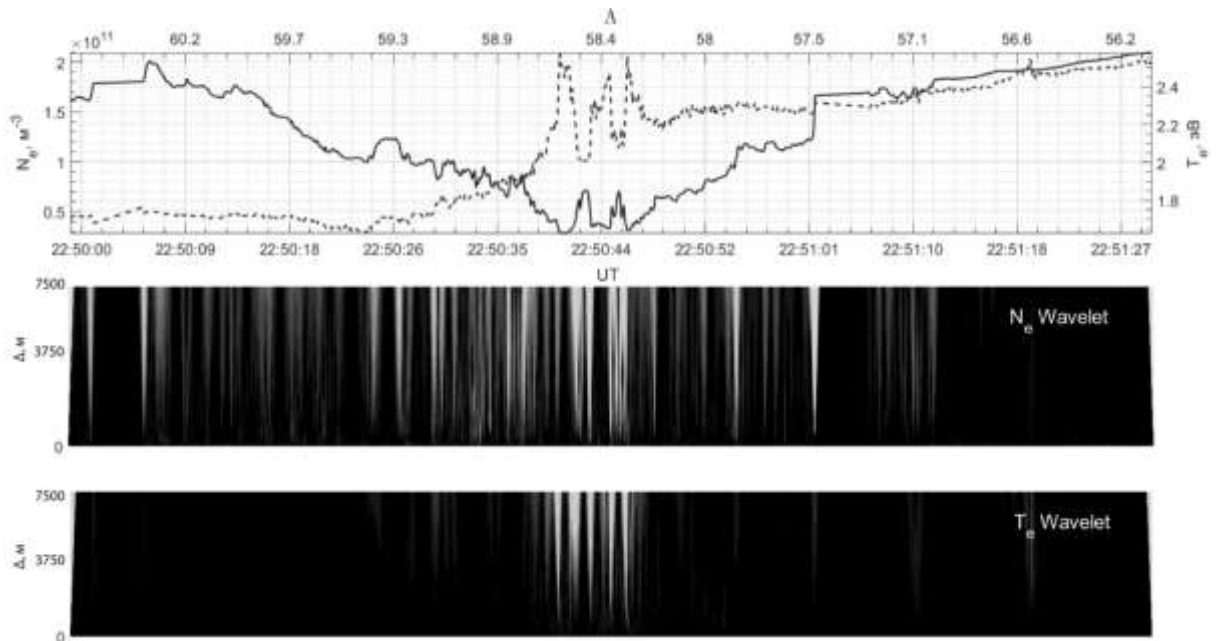


Рисунок 6 — Верхняя панель — изменение концентрации электронов (сплошная линия), температуры электронов (штриховая линия) от геомагнитной широты (верхняя ось абсцисс) и времени UT (нижняя ось абсцисс) по данным спутника NorSat-1 во время геомагнитного события 09 апреля 2018 года в 22 UT. Средняя панель — спектрограмма вейвлет-преобразования электронной концентрации по данным. Нижняя панель — спектрограмма вейвлет-преобразования электронной температуры.

Так было обнаружено новое явление — стратифицированный поляризационный джет, который состоит из 2–4 крупных страт поляризационного джета размером  $0.2^\circ$ – $0.3^\circ$  широты и нескольких мелких страт, имеющих размер  $<0.1^\circ$ . Страты электронной концентрации могут при этом пространственно не совпадать со стратами электронной температуры и могут быть сдвинуты по широте. Также показано, что мелкомасштабные неоднородности температуры электронов внутри страт поляризационного джета более выражены, чем неоднородности электронной концентрации. Кроме того, в разделе в разделе 2.3 «Выводы» высказаны предположения о возможных механизмах генерации страт поляризационного джета.

В рамках **третьей Главы** было исследовано влияние поляризационного джета на прохождение через него радиоволн — сигналов глобальных навигационных спутниковых систем и зондирующих сигналов наземных ионозондов. В разделе 3.1 «Введение» описан набор наземных измерительных инструментов, которые использованы в дополнение к спутниковым в рамках мульти-инструментального анализа влияния на распространение радиоволн через поляризационный джет в северном и южном полушариях.

Раздел 3.2 «Сцинтилляции и потери спутниковых навигационных сигналов» посвящен исследованию влияния поляризационного джета на сцинтилляции и потери сигналов спутников глобальных систем спутниковой навигации в южном полушарии по данным сцинтилляционных приемников. Сцинтилляции сигнала, проходящего через ионосферу, традиционно определяются индексами  $S_4$  и  $\sigma_\phi$  следующим образом (Fremouw et al., 1978; Yeh, Liu, 1982):

$$S_4 = (\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2) / \langle I \rangle^2 \quad (17)$$

$$\sigma_\phi = \langle \phi^2 \rangle - \langle \phi \rangle^2 \quad (18)$$

где  $I$  — интенсивность сигнала (квадрат амплитуды),

$\phi$  — фаза сигнала,

$\langle \rangle$  — скользящее среднее с окном (традиционно — 60 с).

Значения  $\sigma_\phi$  на Рисунке 7 приведены для момента времени 21:25 UT, через четыре минуты после обнаружения поляризационного джета по данным спутника NorSat-1. Из рисунка ясно, что область повышенных значений  $\sigma_\phi$  до 0.6 рад совпадает с областью интенсивного дискретного полярного сияния, а также с экваториальной границей диффузного полярного сияния, где,

согласно спутниковым данным и теории, находится поляризационный джет. У всех рассмотренных спутников в разное время наблюдалось увеличение индексов фазовой и амплитудной скинтиляции, а также потеря захвата сигнала в областях, где их сигнал проходил через поляризационный джет. Это еще раз указывает на сильное влияние поляризационного джета на сигналы ГНСС.

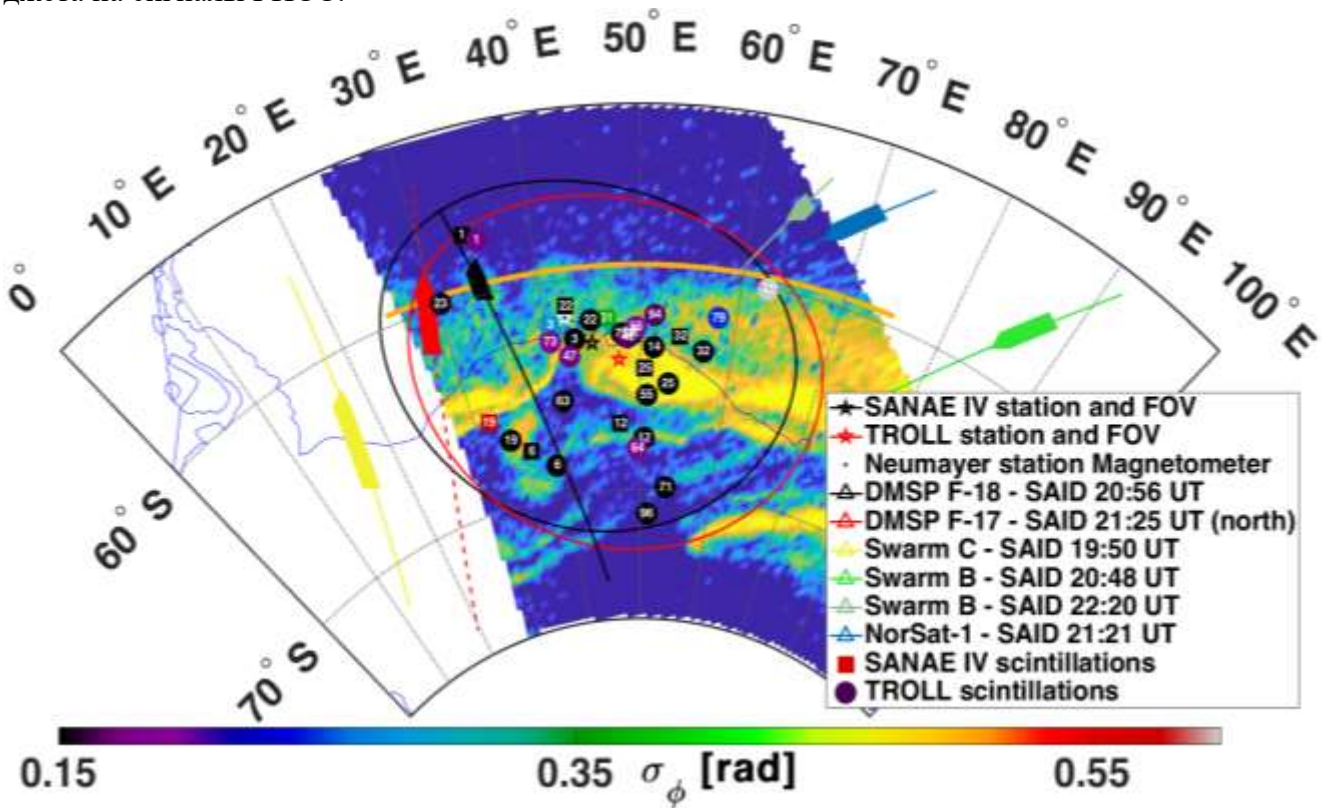


Рисунок 7 — Мультиинструментальное изображение влияния поляризационного джета на фазовые скинтиляции сигналов спутников ГНСС в 21:25 UT. УФ-снимки аврорального излучения в геомагнитных координатах AACGM, полученные с помощью прибора SSUSI, установленного на борту спутника DMSP F-18, пролетающего над Антарктидой 18 марта 2018 года. Оранжевая линия показывает приблизительную границу между авроральной и субавроральной зонами в ионосфере. Значения индекса фазовой скинтиляции показаны в 21:25 UT в соответствии с цветовой шкалой под рисунком — кружками и квадратами (в зависимости от приемной станции).

Влияние поляризационного джета на зондирующий сигнал (отражение на ионограммах) было изучено по данным наземных ионозонд в северном полушарии в разделе 3.3 «Ионозондовые измерения». Полученные результаты обобщаются и обсуждаются в разделе 3.4 «Выводы». Ионозонды, особенно ионосферные цепочки, могут быть одним из наиболее эффективных инструментов для изучения поляризационного джета среди наземных измерительных средств. В разделе 3.1 «Введение» описан ряд признаков присутствия поляризационного джета вертикально над ионосферной станцией проявляет себя на ионограммах. На Рисунке 8 около 17:00 UT наблюдается положительное отклонение  $foF_2$ , за которым следует значительное падение, начинающееся с 18:00 UT. Это падение достигает минимума около 22:30 UT, что совпадает с наблюдениями в Троицке. После 17 UT начинается двух-трехкратное увеличение горизонтальной скорости дрейфа до 200 м/с и более. По мере развития события ионограмма также изменяются. В 20:53 UT наблюдается расщепление следа «O» на следы, идущие с севера (синие фрагменты на частотах 2.6–2.8 МГц), сверху (красные фрагменты на частотах от 1.2 до 3 МГц) и с юго-запада (оранжевые фрагменты на частотах 3.2–3.4 МГц). На необыкновенной ветви это расщепление на три ветви более отчетливо видно на частотах от 3.5 до 3.9 МГц. Примерно в 22 UT появляется четкий след отражения с севера на частотах 1.5–2.1 МГц и расстояниях 580–760 км. В то же время в основном облаке рассеянных

сигналов на частотах 1.7–2.3 МГц и высоте 350–450 км видна U-образная структура, характерная для развитого поляризационного джета (Степанов и др., 2017). Со временем синий след с севера вблизи 2 МГц, по мере развития поляризационного джета, в 23 UT приближается к точке наблюдения на расстояние до 450 км. Эти наблюдения позволяют предположить, что ионограммы отражают продольное снижение ионизации, напоминающее «траншею». Формирование поляризационного джета на высотах ионосферы приводит к значительному снижению  $foF_2$  и повышению высоты слоя F2, что может быть точно определено с помощью ионозондовых измерений.

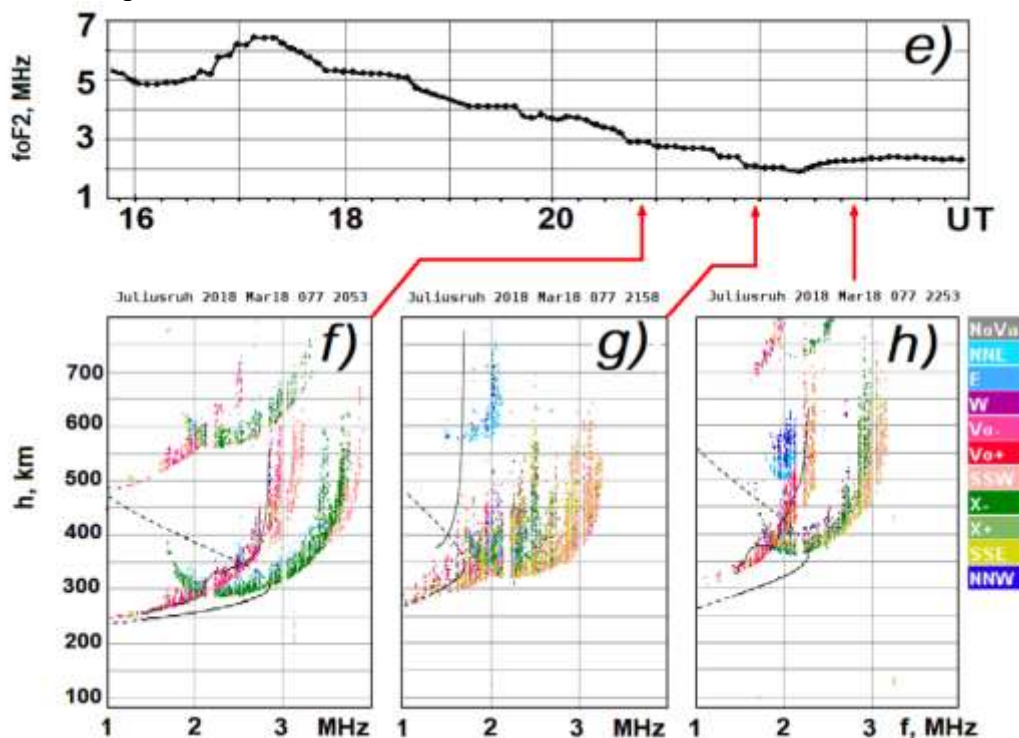


Рисунок 8 — Изменение критической частоты ( $foF_2$ ). (f–i) Ионограммы станции JR055, Юлиусрух, иллюстрирующие характеристики, связанные с поляризационным джетом.

В результате комплексного исследования с использованием множества спутниковых и наземных измерительных средств установлено, что при прохождении трансionoсферного навигационного радиосигнала через полосу поляризационного джета его амплитудные и фазовые сцинтилляции увеличиваются, а также происходит потеря захвата этого радиосигнала. Множественные переотражения радиосигнала, наблюдаемые в виде F-рассеяния на ионограммах во время развития поляризационного джета, обусловлены стратами и мелкомасштабными плазменными неоднородностями поляризационного джета, исследованию которых посвящены первая и вторая Главы диссертационной работы.

В **четвертой Главе** представлен результат анализа параметров поляризационного джета во время экстремальных геомагнитных событий и, в частности, во время экстремальной геомагнитной Бури Победы 10–12 мая 2024 года. В разделе 4.1 «Введение» представлено краткое описание последних экстремальных геомагнитных бурь и их влияния на ионосферную плазму. Проявления поляризационного джета во время геомагнитной Бури Победы рассмотрены более подробно в разделе 4.2 «Экстремальная геомагнитная буря 10–12 мая 2024 года (Буря Победы)». Одновременные наземные и спутниковые измерения ионосферы над Калининградской областью показали, что на начальной фазе этой бури развивался поляризационный джет, который сопровождался таким оптическим явлением как STEVE (MacDonald et al., 2018). Далее в разделе 4.3 «Поляризационный джет во время других экстремальных геомагнитных бурь» представлены результаты анализа большого объема измерений параметров поляризационного джета спутниками DMSP F-14 и F-16 во время всех экстремальных геомагнитных бурь 21 века (Рисунок 9) с помощью специально разработанного полуавтоматического алгоритма. Это позволило

сравнить поведение поляризационного джета во время Бури Победы, во время других экстремальных геомагнитных бурь и во время средней геомагнитной активности.

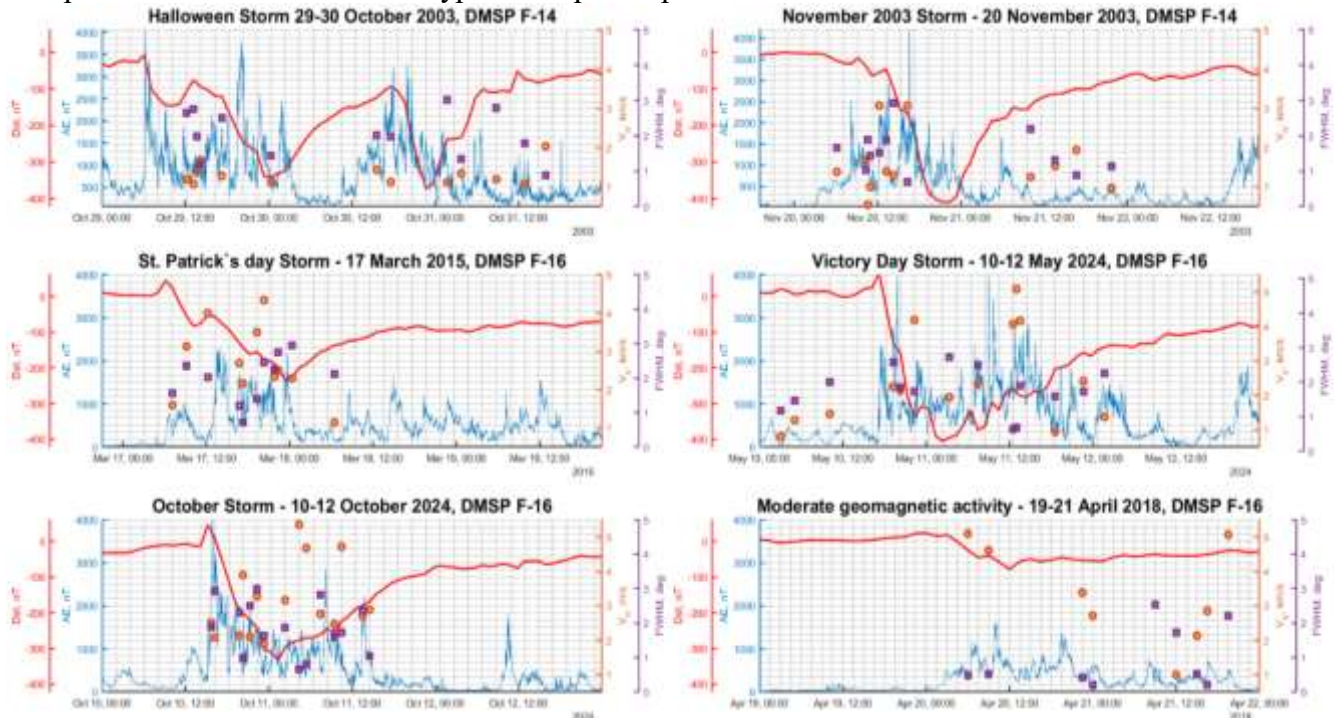


Рисунок 9 — Пиковая скорость горизонтального дрейфа ионов внутри ПД (красные круги) и полуширина ПД (фиолетовые квадраты) во время экстремальных геомагнитных бурь: Буря на Хэллоуин 29–30 октября 2003 года (а), Ноябрьская буря 20 ноября 2003 года (б), Буря Святого Патрика 17 марта 2015 года (с), Буря Победы 10–12 мая 2024 года (д), Октябрьская буря 10–12 октября 2024 года (е) и умеренное геомагнитное возмущение 19–21 апреля 2018 года (ф) относительно геомагнитных индексов Dst и AE.

В разделе 4.4 «Выводы» приведено обсуждение полученной статистики и формулирование выводов. Также в нем приведена Таблица 2, содержащая некоторые статистически определенные параметры поляризационного джета.

Таблица 2 — Параметры ПД во время сильнейших экстремальных геомагнитных бурь 21 века.

Геомагнитное событие	Минимальный Dst, нТл	Средний AE, нТл	Количество обнаружений ПД	Средняя скорость ПД, м/с	Средняя полуширина ПД, °
Хэллоуинская Буря 29–30 октября 2003 года	-383	803	13	1310	1.92
Ноябрьская буря 20 ноября 2003 года	-422	473	12	1593	1.43
Буря Святого Патрика 17 марта 2015 года	-234	492	11	2701	1.98
Буря Победы 10–12 мая 2024 года	-406	705	14	2462	1.65
Октябрьская буря 10–12 октября 2024 года	-333	487	15	3108	1.87
Средняя активность 19–21 апреля 2018 года	-78	280	9	3037	0.98

Современные теории формирования ПД, описанные в первой Главе данной работы, говорят о том, что ПД должен появляться либо только во время основной фазы бури и в минимуме Dst («генератор напряжения»), либо только во время фазы восстановления («генератор

тока»), либо на протяжении всей бури, кроме фазы роста («короткое замыкание»). Из Рисунка 9 видно, что во время экстремальных бурь ПД присутствует либо на обеих фазах, либо только на основной фазе. При уточнении текущих теорий формирования ПД необходимо это учитывать. Согласно Рисунку 9 в минимуме Dst экстремальных геомагнитных бурь ПД либо не обнаруживается, либо обнаруживается заметно менее интенсивный. Кроме того, данные, приведенные на Рисунке 9, подтверждают наблюдение из статьи (Figueiredo, 2004) о наличии антикорреляции между скоростью и шириной ПД, что авторами интерпретируется как признак магнитосферного источника ПД («генератор напряжения» или «короткое замыкание»). Согласно Таблице 2 во время экстремальных геомагнитных событий отсутствует прямая зависимость как скорости и ширины ПД, так и частоты от уровня геомагнитной активности, что противоречит текущей научной парадигме о природе ПД. Во время меньших бурь, таких как Буря Святого Патрика и Октябрьская буря средняя скорость ПД ниже, чем во время более сильных бурь — Бури Победы, Хэллоуинской бури и Ноябрьской бури. Также, ПД с одной из наибольших средней скоростью (3037 м/с) обнаружен во время значительно менее интенсивной средней геомагнитной активности 20 апреля 2018 года (минимальный Dst = -78 нТл). Таким образом показано, что во время Бури Победы скорость поляризационного джета ниже, чем во время умеренных магнитных возмущений. Это связано с особенностями развития данного экстремального события, приводящими к нарушениям механизмов генерации поляризационного джета вследствие подвижности плазмопаузы/аврорального овала, что не позволяет сформировать устойчивый западный дрейф плазмы.

**Заключение.** Представленная диссертационная работа посвящена комплексному исследованию поляризационного джета и его внутренней структуры с помощью спутниковых и наземных измерительных средств. Поляризационный джет представляет собой узкий и очень быстрый поток ионосферной плазмы на субавроральных широтах Земли, приводящий к значительным изменениям в конфигурации ионосферной плазмы, что может повлиять на жизнедеятельность человека в виде нарушения радиосвязи и снижения качества спутниковой навигации. Исследование поляризационного джета важно не только для развития понимания физики ионосферной плазмы, но и с практической точки зрения, поскольку значительная часть территории России лежит на субавроральных широтах, то есть в зоне постоянного возникновения поляризационного джета. Поляризационный джет — одно из сложнейших явлений в ионосферной плазме, исследованию которого посвящено множество работ с момента его открытия советскими учеными в 1973 году. Обнаружение в дальнейшем фиолетового свечения в атмосфере экваториальной области полярных сияний (STEVE) и его связи с поляризационным джетом в 2018 году было заметным событием и привлекло дополнительное внимание научного сообщества к исследованию поляризационного джета. Однако несмотря на значительный объем посвященных ему научных работ, поляризационный джет на сегодняшний день остается изученным не до конца. Остаются открытыми вопросы окончательного механизма генерации поляризационного джета, его внутренней структуры, влияния на прохождение радиосигнала через него, зависимости от геомагнитной активности, а также многие другие. Результаты, полученные в данной диссертационной работе, позволяют в значительной степени приблизиться к получению ответов на эти вопросы.

Итоги выполненного диссертационного исследования подчеркивают важность учета такого ионосферного явления как поляризационный джет при численном моделировании ионосферной плазмы в теоретических и практических применениях. Также следует в дальнейшем при исследовании поляризационного джета учитывать его внутреннюю мелкомасштабную структуру и другие его обнаруженные или уточненные особенности, представленные в данной диссертационной работе. Поляризационный джет остается одним из наиболее перспективных направлений исследования в ионосфере Земли. Продолжение изучения внутренней структуры поляризационного джета позволит улучшить понимание не только ионосферной плазмы, но и всей системы ионосфера-магнитосфера-солнечный ветер. Кроме того, представляется важным для практического использования дальнейшее изучение влияния поляризационного джета на распространение радиоволн в ионосфере. Изучение

поведения параметров поляризационного джета во время экстремальных геомагнитных бурь также представляет интерес, особенно в максимуме 25 солнечного цикла, богатого на сильные геомагнитные события. Разработка и запуск отечественных космических миссий, оборудованных приборами для исследования ионосферы, а также развитие сетей наземных измерительных средств, позволило бы значительно продвинуть российскую ионосферную науку, а в частности в направлении поляризационного джета.

Автор выражает благодарность научному руководителю кандидату физико-математических наук, доценту Чернышову А. А., а также коллективу лаборатории магнитосферных процессов отдела физики космической плазмы ИКИ РАН за плодотворную совместную работу, всестороннюю поддержку и ценные советы.

#### **Публикации автора по теме диссертации.**

1. *Синеви́ч А. А., Чернышов А. А., Чу́гунин Д. В. и др.* Исследование мелкомасштабной структуры поляризационного джета во время геомагнитной бури 20 апреля 2018 г. // Солнечно-земная физика. — 2021. — Т. 7, № 1. — С. 21–33. — DOI: 10.12737/szf-71202103.
2. *Синеви́ч А. А., Чернышов А. А., Чу́гунин Д. В. и др.* Пространственная структура поляризационного джета по данным спутников NorSat 1 и Swarm // Космические исследования. — 2021. — Т. 59, № 6. — С. 489–497. — DOI: 10.31857/S0023420621060091.
3. *Sinevich A. A., Chernyshov A. A., Chugunin D. V. et al.* Small-scale irregularities within polarization jet/SAID during geomagnetic activity // Geophysical Research Letters. — 2022. — Vol. 49. — P. e2021GL097107. — DOI: 10.1029/2021GL097107.
4. *Sinevich A. A., Chernyshov A. A., Chugunin D. V. et al.* Stratified subauroral ion drift (SSAID) // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2023. — Vol. 128. — P. e2022JA031109. — DOI: 10.1029/2022JA031109.
5. *Синеви́ч А. А., Чернышов А. А., Чу́гунин Д. В. и др.* Внутренняя структура поляризационного джета: стратифицированный поляризационный джет // Геомагнетизм и аэрномия. — 2023. — Т. 63, № 6. — С. 764–774. — DOI: 10.31857/S0016794023600333.
6. *Синеви́ч А. А., Чернышов А. А., Чу́гунин Д. В. и др.* Поляризационный джет и плазменные неоднородности различного масштаба // Известия РАН. Серия физическая. — 2024. — Т. 88, № 3. — С. 438–444. — DOI: 10.31857/S0367676524030139.
7. *Sinevich A. A., Chernyshov A. A., Chugunin D. V. et al.* Multi-instrument approach to study polarization jet/SAID and STEVE // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2024. — Vol. 129. — P. e2024JA033222. — DOI: 10.1029/2024JA033222.
8. *Kotova D. S., Sinevich A. A., Chernyshov A. A. et al.* Strong turbulent flow in the subauroral region in the Antarctic can deteriorate satellite-based navigation signals // Scientific Reports. — 2025. — Vol. 15. — P. 3458. — DOI: 10.1038/s41598-025-86960-6.
9. *Chernyshov A. A., Klimenko M. V., Nosikov I. A., Borchevkina O. P., Timchenko A. V., Efshov I. I., Sinevich A. A. et al.* Effects in the upper atmosphere and ionosphere in the subauroral region during Victory Day 2024 geomagnetic storm (May 10–12, 2024) // Advances in Space Research. — 2025. — Vol. 76, Iss. 12. — P. 7325–7350. — DOI: 10.1016/j.asr.2025.02.015.
10. *Chernyshov A. A., Klimenko M. V., Sinevich A. A. et al.* Some aspects of Victory Day 2024 geomagnetic storm occurred on May 10–12, 2024, using satellite and ground-based data // Russian Journal of Earth Sciences. — 2025. — Vol. 25. — P. ES501. — DOI: 10.2205/2025es001009.
11. *Sinevich A. A., Chernyshov A. A., Pulinets S. A. et al.* First study of polarization jet/SAID using onboard ionosonde on Ionosfera-M satellite // Advances in Space Research. — 2026. — Vol. 77, Iss. 3. — P. 3618–3627. — DOI: 10.1016/j.asr.2025.11.097.

#### **Список литературы.**

12. *Гальперин Ю. И., Пономарев В. Н., Зосимова А. Г.* Прямые измерения скорости дрейфа ионов в верхней ионосфере во время магнитной бури. I. Вопросы методики и некоторые результаты измерений в магнитно-спокойное время // Космические исследования. — 1973а. — Т. 11, № 2. — С. 273–283.

13. Гальперин Ю. И., Пономарев В. Н., Зосимова А. Г. Прямые измерения скорости дрейфа ионов в верхней ионосфере во время магнитной бури. II. Результаты измерений во время магнитной бури 3 ноября 1967 г. // *Космические исследования*. — 1973б. — Т. 11, № 2. — С. 284–296.
14. Степанов А. Е., Халипов В. Л., Голиков И. А. и др. Поляризационный джет: узкие и быстрые дрейфы субавроральной ионосферной плазмы — Якутск: ИКФИА СО РАН, 2017.
15. Anderson P. C., Hanson W. B., Heelis R. A. et al. A proposed production model of rapid subauroral ion drifts and their relationship to substorm evolution // *Journal of Geophysical Research*. — 1993. — Vol. 98, Iss. A4. — P. 6069–6078. — DOI: 10.1029/92JA01975.
16. Figueiredo S., Karlsson E., Marklund G. Investigation of subauroral ion drifts and related field-aligned currents and ionospheric Pedersen conductivity distribution // *Annales Geophysicae*. — 2004. — Vol. 22. — P. 923–934.
17. Foster J. C., Burke W. J. SAPS: A new categorization for subauroral electric fields // *EOS Transactions AGU*. — 2002. — Vol. 83. — P. 293–294.
18. Fremouw E. J., Leadabrand R. L., Livingston R. C. et al. Early results from the DNA Wideband satellite experiment — Complex-signal scintillation // *Radio Science*. — 1978. — Vol. 13, No. 1. — P. 167–187. — DOI: 10.1029/RS013i001p00167.
19. Galperin Y. I. Polarization jet: characteristics and model // *Annales Geophysicae*. — 2002. — Vol. 20, Iss. 3. — P. 391–404.
20. Hoang H., Clausen L. B. N., Røed K. et al. The Multi-Needle Langmuir Probe System on Board NorSat-1 // *Space Science Reviews*. — 2018. — Vol. 214, Iss. 4. — P. 75. — DOI: 10.1007/s11214-018-0509-2.
21. Jacobsen K. S., Pedersen A., Moen J. I. et al. A new Langmuir probe concept for rapid sampling of space plasma electron density // *Measurement Science and Technology*. — 2010. — Vol. 21, Iss. 8. — P. 085902. — DOI: 10.1088/09570233/21/8/085902.
22. MacDonald E. A., Donovan E., Nishimura Y. et al. New science in plain sight: Citizen scientists lead to the discovery of optical structure in the upper atmosphere // *Science Advances*. — 2018. — Vol. 4, No. 3. — DOI: 10.1126/sciadv.aag0030.
23. Mishin E. V., Puhl-Quinn P. SAID: Plasmaspheric short circuit of substorm injections // *Geophysical Research Letters*. — 2007. — Vol. 34. — P. L24101. — DOI: 10.1029/2007GL031925.
24. Mishin E. V., Puhl-Quinn P. A., Santolik O. SAID: A turbulent plasmaspheric boundary layer // *Geophysical Research Letters*. — 2010. — Vol. 37. — P. L07106. — DOI: 10.1029/2010GL042929.
25. Mott-Smith H. M., Langmuir I. The Theory of Collectors in Gaseous Discharges // *Physical Review*. — 1926. — Vol. 28. — P. 727–763. — DOI: 10.1103/PhysRev.28.727.
26. Southwood D. J., Wolf R. A. An assessment of the role of precipitation in magnetospheric convection // *Journal of Geophysical Research*. — 1978. — Vol. 83. — P. 5227–5232. — DOI: 10.1029/JA083iA11p05227.
27. Spiro R. W., Heelis R. A., Hanson W. B. Rapid subauroral ion drifts observed by Atmosphere Explorer C // *Geophysical Research Letters*. — 1979. — Vol. 6, Iss. 8. — P. 657–660. — DOI: 10.1029/GL006i008p00657.
28. Yeh K. C., Liu C. H. Radio wave scintillations in the ionosphere // *Proceedings of the IEEE*. — 1982. — Vol. 70, Iss. 4. — P. 324–360. — DOI: 10.1109/PROC.1982.12313.