

На правах рукописи



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

Москва — 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте Космических Исследований Российской Академии Наук (ИКИ РАН) и Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования Национальном Исследовательском Университете «Высшая Школа Экономики»

*Научный
руководитель:*

Чернышов Александр Александрович
кандидат физико-математических наук, старший
научный сотрудник отдела физики космической плазмы
ИКИ РАН, доцент НИУ ВШЭ

*Официальные
оппоненты:*

Захаров Виктор Иванович
кандидат физико-математических наук, МГУ им.
Ломоносова, физический факультет, доцент по кафедре
Ясюкевич Юрий Владимирович
доктор физико-математических наук, ИСЗФ СО РАН,
заместитель директора по научно-исследовательской
работе

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Федеральный исследовательский центр «Якутский
научный центр Сибирского отделения Российской
академии наук»

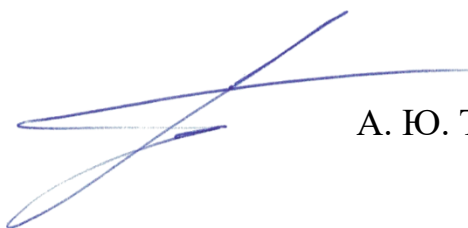
Защита состоится «25» сентября 2026 г. в 13 часов на заседании диссертационного совета 24.1.481.01 при ИКИ РАН, расположенном по адресу: 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная 84/32, подъезд А2 (конференц-зал).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИКИ РАН, <http://www.iki.rssi.ru/diss/2026/sinevich.htm>.

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.

Настоящая диссертационная работа посвящена исследованию внутренней мелкомасштабной структуры поляризационного джета и ее влияния на прохождение радиоволн через ионосферу.

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 такое явление, как STEVE (Strong Thermal Emission Velocity Enhancement) и узкие потоки быстрых субавроральных ионных дрейфов к западу вблизи проекции плазмопаузы на высотах области F-слоя ионосферы (поляризационный джет (ПД)), которые наиболее заметно проявляются во время бурь/суббурь на фоне крупномасштабной конвекции плазмы. Скорость плазмы в поляризационном джете может достигать нескольких километров в секунду, а размер плазменных неоднородностей внутри него может достигать масштабов от десятков метров до нескольких сотен метров. Такие высокие скорости и структурированная плазма 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 ПД, 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 ПД, или научная аппаратура на борту спутников не позволяла проводить измерения с высоким временным разрешением. Мелкомасштабные процессы внутри ПД практически не исследованы, и здесь остается много открытых вопросов. Ключевые вопросы, связанные с физикой возникновения ПД и формированием мелкомасштабных структур внутри ПД, остаются открытыми ввиду отсутствия общепринятой теоретической модели и недостаточной экспериментальной изученности этих процессов. Настоящая диссертационная работа посвящена исследованию мелкомасштабной структуры ПД и ее влияния на прохождение радиоволн через ионосферу.

Цели и задачи.

Основной целью диссертационной работы является комплексное исследование мелкомасштабной структуры ПД с использованием спутниковых и наземных данных, и влияния ПД на прохождение радиоволн.

Для достижения этой цели решались следующие задачи:

1. Разработка методики исследования ПД по спутниковым данным с высоким пространственным разрешением для обнаружения неоднородностей концентрации и температуры электронов с масштабами до сотен метров. Анализ параметров плазмы в ПД в зависимости от уровня геомагнитной активности и определение скорости широтного смещения ПД как функции местного магнитного времени;

2. Детальный анализ широтных профилей электронной температуры и концентрации внутри ПД для выделения отдельных страт различного масштаба и установление их качественных и количественных характеристик (число страт, взаимное положение страт температуры и концентрации);

3. Совместное исследование ПД с привлечением данных спутниковых наблюдений, одновременных измерений амплитудных и фазовых сцинтилляций сигналов глобальных навигационных спутниковых систем, в том числе в условиях потери захвата сигнала, а также локальных карт полного электронного содержания и ионограмм. Изучение влияния ПД и его внутренней структуры на навигационные сигналы и характер ионограмм;

4. Анализ экстремальных геомагнитных событий, в том числе бури в мае 2024 года. Сравнение скорости ПД в этом событии со скоростью ПД при умеренном геомагнитном возмущении. Изучение особенностей ПД во время экстремальных геомагнитных бурь в 21 веке и их зависимости от фаз развития бури.

Научная новизна.

Несмотря на наличие большого количества научных работ, посвященных исследованию различных крупномасштабных характеристик ПД, мелкомасштабная структура ПД 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 ПД или научная аппаратура на борту спутников не позволяла проводить измерения с высоким временным разрешением. В диссертационной работе для исследования ПД 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 ПД во время геомагнитной активности.

Результаты измерений были проанализированы различными методами анализа данных, среди которых впервые введенный и использованный для исследования ПД метод $\Delta N/N$. Использование данного метода позволило обнаружить новый тип явлений (и ввести в научную литературу термин для его обозначения) — стратифицированный ПД, состоящий из крупномасштабных и мелкомасштабных страт ПД. Кроме того, впервые для изучения ПД использован

мультиинструментальный подход — уникальная комбинация большого количества одновременных измерений ПД спутниковыми и наземными средствами. Это позволило провести комплексное исследование свойств и внутренней структуры ПД, а также впервые определить влияние ПД, его страт и мелкомасштабных неоднородностей ПД на прохождение радиосигналов, в том числе сигналов глобальных систем спутниковой навигации. Впервые продемонстрировано, что провал электронной концентрации, связанный с развитием ПД в субавроральной ионосфере, наблюдается на локальных картах полного электронного содержания.

В мае 2024 года была зарегистрирована экстремальная геомагнитная буря, представляющая большой интерес для фундаментальных исследований процессов в ионосфере. В диссертационной работе по спутниковым данным впервые изучена динамика ПД во время этого события. На ионограммах ПД проявлялся в виде характерных U-образных структур, появление которых коррелировало с ростом индекса, характеризующего вариации полного электронного содержания. Сравнение с параметрами ПД во время других экстремальных геомагнитных событий показало, что скорость ПД во время сильнейших геомагнитных бурь в среднем ниже, чем во время умеренной геомагнитной активности. Также продемонстрировано, что ПД наблюдается как на основной фазе, так и на фазе восстановления интенсивного геомагнитного возмущения.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Поскольку ПД 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 ПД и его внутренней мелкомасштабной структуры, что позволяет улучшить понимание процессов в субавроральной области ионосферы и магнитосферы, а также актуализировать текущие теории генерации ПД. Кроме того, результаты диссертационной работы дают возможность уточнения математических моделей как ПД, 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 ПД 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 ПД, 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 ПД радиосигналов. В практических приложениях во время геомагнитных возмущений необходимо учитывать не только высыпание заряженных частиц в авроральном овале, но и развитие ПД в субавроральной зоне. Таким образом, исследование внутренней мелкомасштабной структуры ПД важно как для фундаментальной науки, так и для практических применений.

Обоснованность и достоверность полученных результатов

Обоснованность научных положений подтверждается согласием полученных результатов с результатами теоретических и экспериментальных работ, имеющимися на данный момент в литературных источниках. 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 сопоставлением результатов с предсказаниями теории, а также согласием с результатами, опубликованными ранее в научной литературе.

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° – 0.3° 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 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.

Апробация работы.

Результаты диссертационной работы докладывались автором на российских и международных научных семинарах и 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, НЦФМ (Саров: 2024, 2025);
- ISEE Symposium PWING-ERG Conference and school on the inner magnetosphere. ISEE, Nagoya University (Япония, Нагоя, 2021);
- Семинар норвежско-российского проекта 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. Автор участвовал в постановке и разработке научных задач. 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 10 научных статьях, опубликованных в журналах, рекомендованных ВАК и индексируемых WoS (Web of Science), Scopus и РИНЦ. Результаты диссертационной работы представлены в 27 тезисах докладов на российских и международных конференциях и симпозиумах.

Объем и структура диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, словаря терминов и списка литературы. Библиография включает 258 наименований. Объем диссертации составляет 181 страницу, включая 67 рисунков и две таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи, приведены сведения о научной новизне, теоретической и практической значимости диссертационной работы. Перечислены положения, выносимые на защиту, описаны степень достоверности и апробация полученных результатов, личный вклад автора, количество публикаций и структура диссертации.

В **первой Главе** приведены результаты исследования внутренней мелкомасштабной структуры ПД по высокочастотным измерениям.

В разделе 1.1 представлен подробный анализ научной литературы, посвященной ПД, в частности, его характеристикам и предполагаемым механизмам возникновения. Впервые ПД обнаружен по измерениям советского спутника «Космос-184», причем данное явление было интерпретировано 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). В результате исследований определено, что ПД возникает от 18 до 02 MLT экваториальнее границы авроральной зоны между 55° и 70° геомагнитной широтой и частота его появления зависит от геомагнитной активности. В дальнейшем проведено большое количество спутниковых и наземных исследований, в которых определены основные крупномасштабные характеристики ПД, описываемые в данном разделе. Также в разделе 1.1 дан подробный обзор литературы по имеющимся на данный момент теориям, описывающим физику возникновения ПД («генератор напряжения», «генератор тока» и «короткое замыкание»).

Раздел 1.2 посвящен спутниковым миссиям, данные которых использованы в диссертационной работе, а также установленным на них измерительным приборам, принципам их действия и методам расчета плазменных параметров. Использование уникальных измерений многоигольного зонда Ленгмюра с рекордно высокой пространственной частотой опроса на спутнике NorSat-1 позволило впервые подробно проанализировать внутреннюю мелкомасштабную структуру ПД во время геомагнитной активности 20 апреля 2018 года и затем сравнить измерения спутника NorSat-1 с измерениями спутников Swarm. Результаты этого анализа представлены в разделе 1.3, а их обсуждение — в разделе 1.4.

На Рисунке 1 показаны пролеты спутников NorSat-1, Swarm C и DMSP F-17 в координатах MLAT-MLT. Из этого рисунка видно, что пролеты NorSat-1 и Swarm C отстоят друг от друга на 2 часа MLT. Учитывая, что в среднем ПД охватывает около 6 часов MLT, как известно из литературы, и пролеты совпадают по времени (разница составляет 6 минут в случае первого пролета), можно предположить, что ПД, присутствовавший в момент пролета NorSat-1, присутствует и в момент пролета Swarm C. Также использованы измерения скорости дрейфа ионов *in situ* спутника DMSP F-17 и данные доплеровской

скорости радаров SuperDARN, чтобы явно доказать, что ПД присутствовал во время этой бури. DMSP F-17 пролетал на высоте ~ 849 км от экватора в направлении северного полюса в секторе ~ 18 MLT в $\sim 10:40$ UT, и его измерения электронной концентрации и горизонтальной скорости дрейфа ионов представлены на Рисунке 1с. В интервале 58.2° – 60.3° геомагнитной широты ($10:39:42$ – $10:40:25$ UT), отмеченном серой областью, провал электронной концентрации шириной $\sim 2.2^\circ$ по широте совпадает с увеличением скорости дрейфа до более чем 1000 м/с.

На Рисунках 1d и 1e представлены измерения доплеровской скорости дрейфа ионосферной плазмы, полученные радаром SuperDARN на высотах области ионосферы F2 (~ 300 км). Стрелка на Рисунке 1d указывает на полосу западных плазменных дрейфов шириной 1° – 2° широты с доплеровскими скоростями 500 – 1500 м/с, наблюдавшихся в $10:46$ UT, что почти в то же время, что и ПД, обнаруженный по данным DMSP F-17. Стрелки на Рисунке 1e иллюстрируют полосы сильных западных плазменных дрейфов, со скоростями выше 1200 м/с и шириной 2° – 4° широты в $07:47$ UT, что примерно через 1 час после одного из самых значительных подъемов геомагнитной активности во время бури, произошедшего примерно в $06:40$ UT.

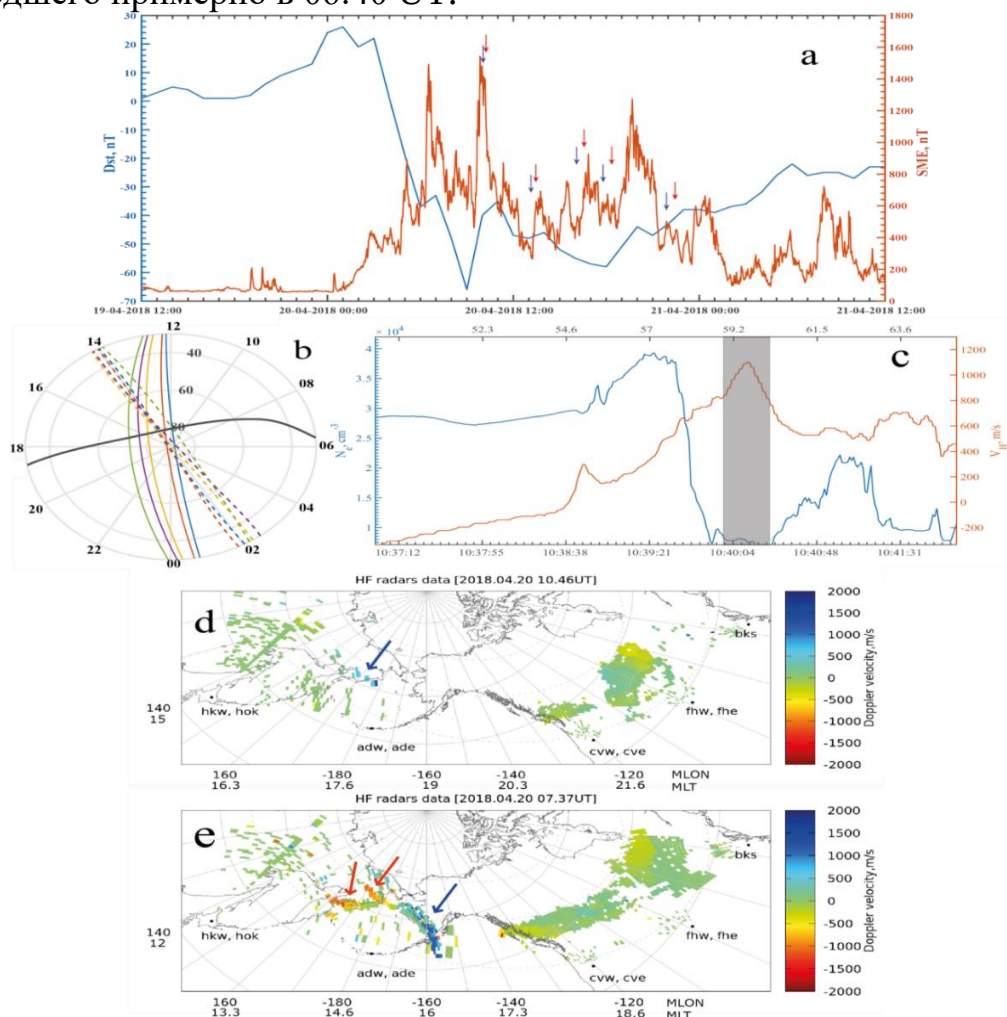


Рисунок 1 — (a) Геомагнитные индексы Dst (синяя линия) и SME (красная) с 12 UT 19.04.2018 по 12 UT 21.04. 2018. Стрелки указывают, когда обнаружен ПД в каждом из рассматриваемых пролетов NorSat-1 (красная) и Swarm C (синяя). (b)

Траектории пролетов спутников в координатах MLAT-MLT. Линии показывают с первого по пятый пролеты NorSat-1 (сплошной цвет), Swarm C (пунктирная линия) и DMSP F-17 (сплошной черный). (с) Эволюция скорости горизонтального дрейфа ионов (красная) и электронной концентрации (синяя) по DMSP F-17 в 10:37–10:42 UT. (d, e) Данные доплеровской скорости с радаров SuperDARN в 10:46 (d) и в 07:37 UT (e). Красные и синие области, обозначенные стрелками, показывают скорости западного дрейфа. Географические широты обозначены сплошными контурами, геомагнитные — пунктирными.

На Рисунке 2 представлены измеренные m-NLP на борту спутника NorSat-1 значения электронной температуры и концентрации при пересечении ПД в геомагнитных координатах. Экваториальнее участка, отмеченного красной стрелкой, простирается область, со стороны экватора ограниченная небольшим подъемом электронной концентрации (показан синей стрелкой) на 52.2° геомагнитной широты (10:11:44 UT). Внутри данной области присутствует несколько участков, на которых заметны повышения электронной температуры в ~ 1.2 раза и соответствующие им возрастания спектральной интенсивности на частотах до ~ 250 Гц (средняя панель). Наличие нескольких узких участков пониженной электронной концентрации, совпадающих с повышением электронной температуры, позволяет предположить, что внутри ПД неоднороден и, возможно, состоит из страт. Поскольку ПД 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 ~ 300 Гц и концентрации электронов на частотах до ~ 100 Гц. По данным спектрограмм можно сделать вывод о наличии мелкомасштабных неоднородностей температуры внутри ПД с пространственными размерами до сотен метров.

Для более подробного исследования динамики развития ПД и его пространственной структуры, а также для подтверждения корректной работы многоугольной системы зондов Ленгмюра на спутнике NorSat-1, проведено сравнение полученных результатов с измерениями на спутнике Swarm C, который в рассматриваемый момент времени пролетал близко к спутнику NorSat-1. На Рисунке 3 представлено сравнение изменений концентрации и температуры электронов по наблюдениям спутников NorSat-1 (Рисунок 3а) и Swarm C (Рисунок 3b) во время совместного пролета. Подъемы температуры внутри ПД, измеренные спутником Swarm C с частотой опроса 2 Гц, схожи по размерам и местоположению с провалами концентрации внутри ПД, 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, указывают на то, что 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).

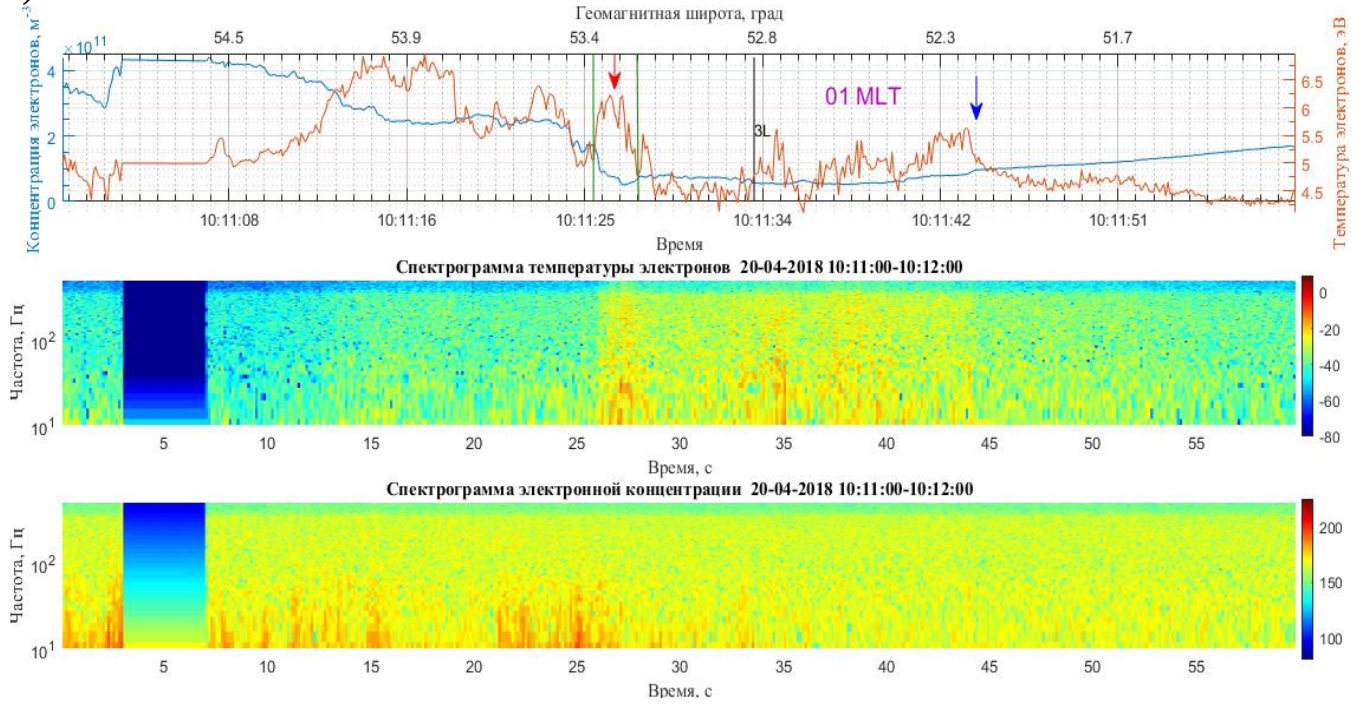


Рисунок 2 — Значения концентрации (синяя линия) и температуры (красная линия) электронов и их спектрограммы, измеренные NorSat-1 во время пролета в 10 UT 20 апреля 2018 года. Красная стрелка и зеленые вертикальные линии — наиболее глубокая часть у полярной стенки субаврорального провала электронной концентрации. Синей стрелкой отмечена экваториальная граница провала электронной концентрации.

Для детального анализа мелкомасштабных неоднородностей был использован индекс скорости изменения плотности (Rate of Change of Density Index, RODI):

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

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

$$\overline{ROD} = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{t_i=t-\frac{\Delta t}{2}}^{t_i=t+\frac{\Delta t}{2}} ROD(t_i)}. \quad (3)$$

ROD (Rate of Change of Density) определяется как производная по времени от электронной концентрации:

$$ROD(t) = \frac{N_e(t + \Delta t) - N_e(t)}{\Delta t}. \quad (4)$$

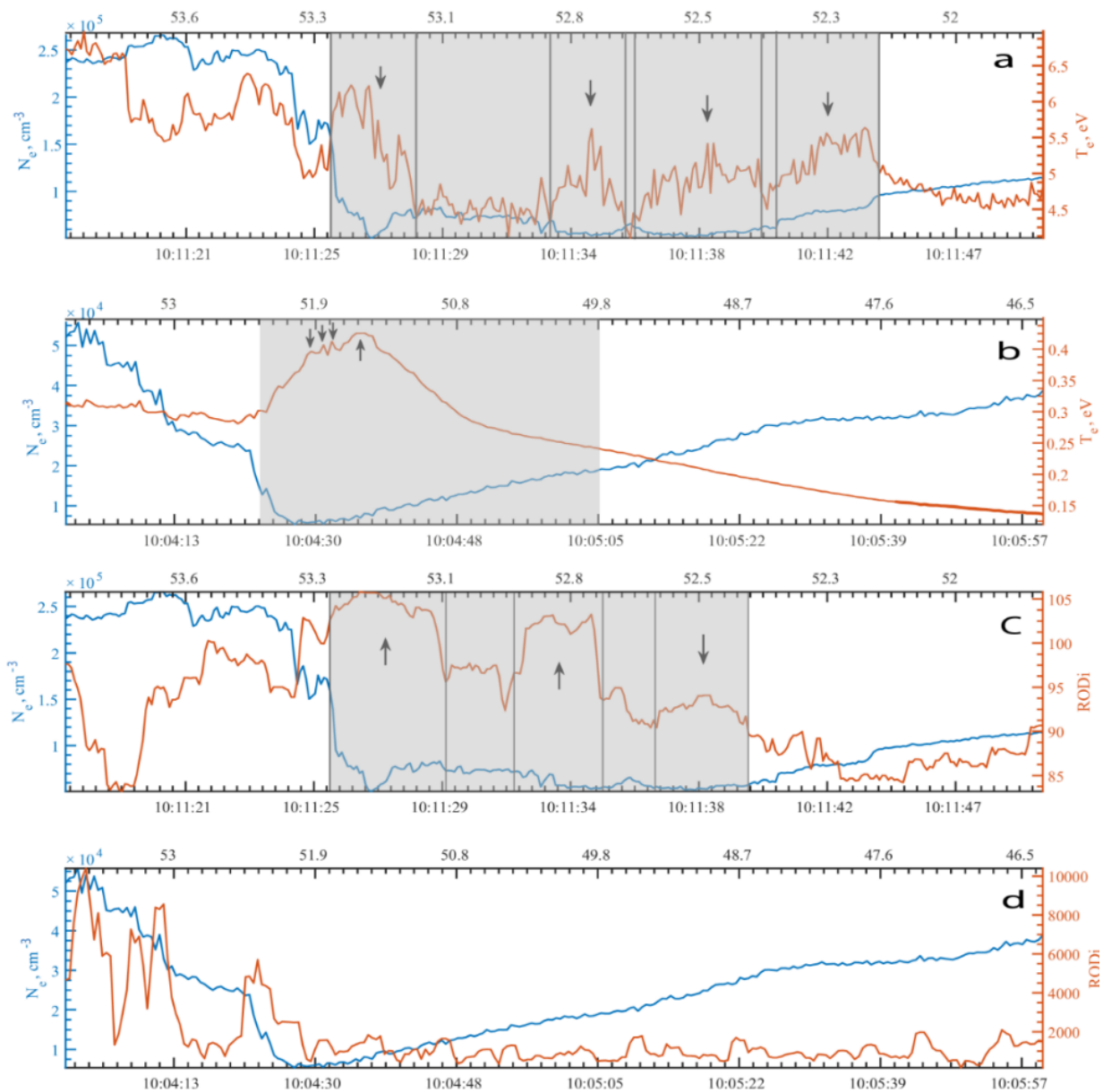


Рисунок 3 — Изменение температуры и электронной концентрации во время пролета NorSat-1 (a) и пролета Swarm C (b). Эволюция индекса скорости изменения концентрации (RODI) и электронной концентрации во время пролета NorSat-1 (c) и пролета Swarm C (d). Серые области выделяют положение ПД. Стрелки указывают на небольшие пики температуры (a, b) и RODI (c), которые можно интерпретировать как страты ПД.

Рисунки 3c и 3d 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 интервалам увеличения электронной температуры на Рисунке 3a. Рост RODI указывает на наличие мелкомасштабных неоднородностей/градиентов электронной концентрации в стратах внутри ПД 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 произведено также сравнение Фурье-спектров измеренной электронной концентрации во время пяти последовательных пересечений ПД, 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 ± 0.02	1.89 ± 0.09
Второй	1.93 ± 0.01	1.57 ± 0.15
Третий	1.89 ± 0.02	1.93 ± 0.14
Четвертый	1.84 ± 0.03	1.78 ± 0.10
Пятый	1.80 ± 0.03	1.61 ± 0.08
«Спокойный»	1.88 ± 0.03	1.64 ± 0.08

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

Во **второй Главе** приведены результаты продолжения исследования мелкомасштабной структуры ПД 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 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 более широкий участок субавроральных широт с западными ионными дрейфами, включает в себя ПД и, вероятно, имеет схожую с ним природу. Внутренняя структура ПД ранее исследована не была. В разделе 2.2 представлены результаты анализа высокочастотных данных спутника NorSat-1 двумя разными методами — $\Delta N/N$ и вейвлет-преобразованием, а в разделе 2.3 — обсуждение полученных результатов. Метод $\Delta N/N$ ($\Delta T/T$) показывает отклонение N (T) от среднего значения на разных масштабах:

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{N - SMA(N)}{SMA(N)}, \quad (5)$$

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{T - SMA(T)}{SMA(T)}, \quad (6)$$

где SMA — простое скользящее среднее. Используя этот параметр, можно обнаружить неоднородности параметров плазмы и определить их

пространственные размеры. В данном исследовании параметры $\Delta N/N$ и $\Delta T/T$ рассчитываются отдельно для каждого окна скользящего среднего с пространственными размерами от 0.01° широты до 1° 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 (Δ), а значение $\Delta N/N$ или $\Delta T/T$ представлено в виде цветовой шкалы. Кроме того, применены методы фильтрации высокочастотных и высокоинтенсивных шумов. Согласно Рисунку 4, наибольший пик температуры (красная линия) пространственно совпадает с наиболее глубоким провалом электронной концентрации (синяя линия). В сторону экватора от полярной стенки заметны еще два провала электронной концентрации, совпадающие с ростом электронной температуры, на геомагнитных широтах 55.9° – 55.6° и 55.1° – 54.8° . Внутри ПД на Рисунке 4 параметры $\Delta N/N$ и $\Delta T/T$ подтверждают наличие четырех различных страт ПД электронной температуры и концентрации на геомагнитных широтах 56.3° – 56° , 55.9° – 55.6° , 55.3° – 55.4° и 55° – 54.8° , шириной в 0.3° , 0.3° , 0.1° и 0.2° широты соответственно. Вторая от полярной стенки страта ПД, в свою очередь, состоит из нескольких небольших страт размером $<0.1^\circ$ широты. Таким образом, обнаружено новое явление — стратифицированный ПД, который, как правило, состоит из 2–4 крупных страт ПД размером 0.2° – 0.3° широты и нескольких мелких страт, имеющих размер $<0.1^\circ$, как показано при анализе различных случаев наличия стратифицированного ПД во время различного уровня геомагнитного возмущения.

Помимо метода $\Delta N/N$ в рамках второй Главы диссертационной работы для исследования страт ПД и мелкомасштабных неоднородностей внутри них был применен вейвлет-анализ, где в качестве базисной функции использовался вейвлет-функция Хаара (часто рассматривается как частный случай вейвлета Добеши первого порядка). Вейвлет-анализ показал, что страты электронной концентрации могут пространственно не совпадать со стратами электронной температуры и могут быть сдвинуты по широте. Также показано, что мелкомасштабные неоднородности температуры электронов внутри страт ПД более выражены, чем неоднородности электронной концентрации. Кроме того, в разделе 2.3 высказаны предположения о возможных механизмах генерации страт ПД.

В рамках **третьей Главы** исследовано влияние ПД на прохождение через него радиоволн — сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) и зондирующих сигналов наземных ионозондов. В разделе 3.1 описан набор наземных измерительных инструментов, которые использованы наряду со спутниковыми наблюдениями в рамках мульти-инструментального анализа влияния на распространение радиоволн ПД в северном и южном полушариях.

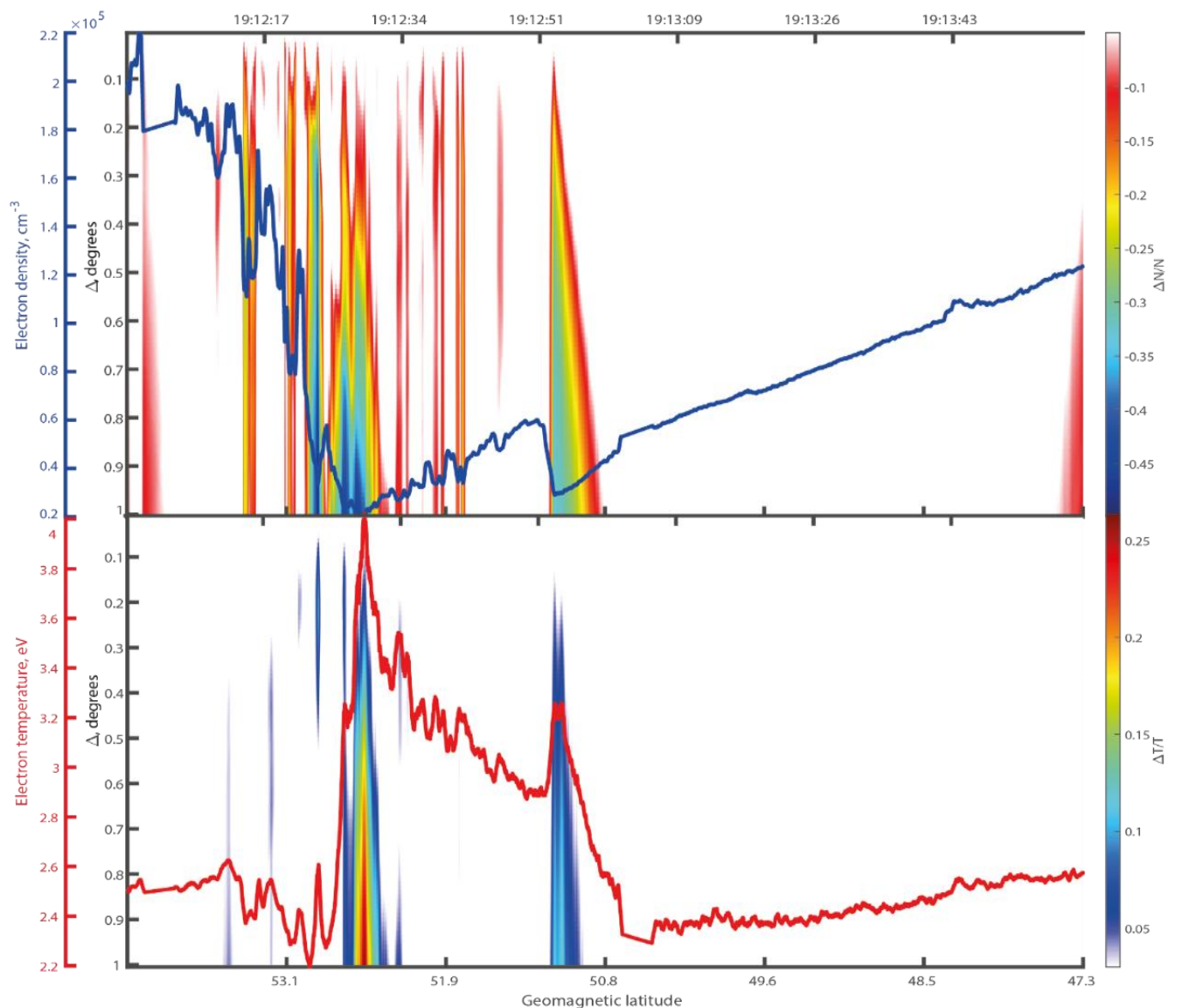


Рисунок 4 — Верхняя панель — Динамика горизонтальной (красная линия на верхнем графике) и вертикальной (фиолетовая линия на верхнем графике) скоростей дрейфа ионов, электронной концентрации (синяя линия на верхнем графике), температуры ионов (красная линия на нижнем графике) и электронов (синяя линия 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.

Раздел 3.2 посвящен исследованию влияния ПД на сцинтилляции и потери сигналов спутников глобальных систем спутниковой навигации в южном полушарии по данным сцинтилляционных приемников ГНСС во время двух геомагнитных событий. Сцинтилляции сигнала, проходящего через ионосферу, традиционно определяются индексами S4 и σ_f следующим образом:

$$S4 = (\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2) / \langle I \rangle^2 \quad (7)$$

$$\sigma_\phi = \langle \phi^2 \rangle - \langle \phi \rangle^2 \quad (8)$$

где I — интенсивность сигнала (квадрат амплитуды), ϕ — фаза сигнала, $\langle \rangle$ — скользящее среднее с окном (традиционно — 60 с).

Значения σ_ϕ на Рисунке 5 приведены для момента времени 21:25 UT, через четыре минуты после обнаружения ПД по данным спутника NorSat-1. Из рисунка ясно, что область повышенных значений σ_ϕ до 0.6 рад совпадает с областью интенсивного дискретного полярного сияния, а также с экваториальной границей диффузного полярного сияния, где, согласно экспериментальным наблюдениям и существующим теориям, находится ПД. У всех рассмотренных спутников в разное время наблюдалось увеличение индексов фазовой и амплитудной сцинтилляции, а также потеря захвата сигнала в областях, где их сигнал проходил через субавроральную область, где развивался ПД. Когда сигнал подвергается настолько сильным изменениям, что приемник перестает отслеживать сигнал от спутника, происходит потеря захвата сигнала. Это дополнительно указывает на заметное влияние ПД на сигналы ГНСС.

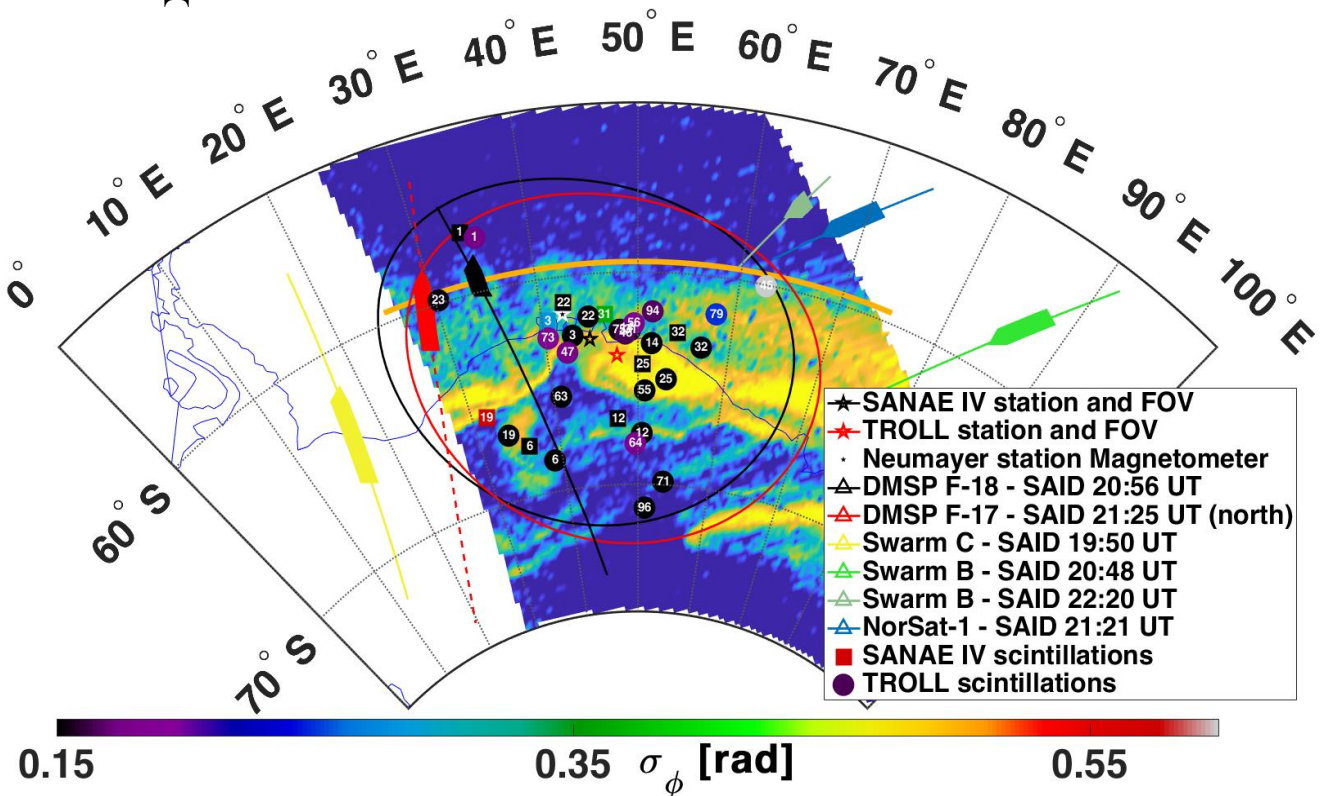


Рисунок 5 — Мультиинструментальное изображение влияния ПД на фазовые сцинтилляции сигналов спутников ГНСС в 21:25 UT. УФ-снимки аврорального излучения в геомагнитных координатах AACGM, полученные с помощью прибора SSUSI, установленного на борту спутника DMSP F-18, пролетающего над Антарктидой 18 марта 2018 г. Оранжевая линия показывает границу между авроральной и субавроральной зонами в ионосфере. Значения индекса фазовой сцинтилляции показаны в 21:25 UT в соответствии с цветовой шкалой под рисунком — кружками и квадратами (в зависимости от приемной станции).

Влияние ПД на зондирующий сигнал (отражение на ионограммах) изучено по данным наземных ионозондов в северном полушарии в разделе 3.3. Полученные результаты обобщаются и обсуждаются в разделе 3.4. Ионозонды, особенно ионосферные цепочки, могут быть одними из наиболее эффективных наземных инструментов для изучения ПД. В разделе 3.1 описан ряд признаков присутствия ПД вертикально над ионосферной станцией и как ПД может проявляться на ионограммах. В данном разделе рассмотрены ионограммы трех, расположенных рядом приблизительно на одной широте – в Троицке (Москва), в Ладушкине (Калининградская область) и в Юлиусрухе (Северная Германия). На Рисунке 66 по данным ионозонда в Юлиусрухе наблюдается значительное падение критической частоты F-слоя ионосферы, начинающееся с 18:00 UT. Это падение достигает минимума около 22:30 UT, что совпадает с наблюдениями в Троицке. В 20:53 UT наблюдается расщепление следа «О» 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 ПД. Со временем синий след с севера вблизи 2 МГц, по мере развития ПД, 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 ПД на высотах ионосферы приводит к значительному снижению f_oF_2 и повышению высоты слоя F2, что может быть точно определено с помощью ионозондовых измерений.

В результате комплексного исследования с использованием большого количества спутниковых и наземных измерительных средств установлено, что при прохождении трансionoсферного навигационного радиосигнала через полосу ПД 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 ПД, обусловлены стратами и мелкомасштабными плазменными неоднородностями ПД, исследованию которых посвящены первая и вторая Главы диссертационной работы.

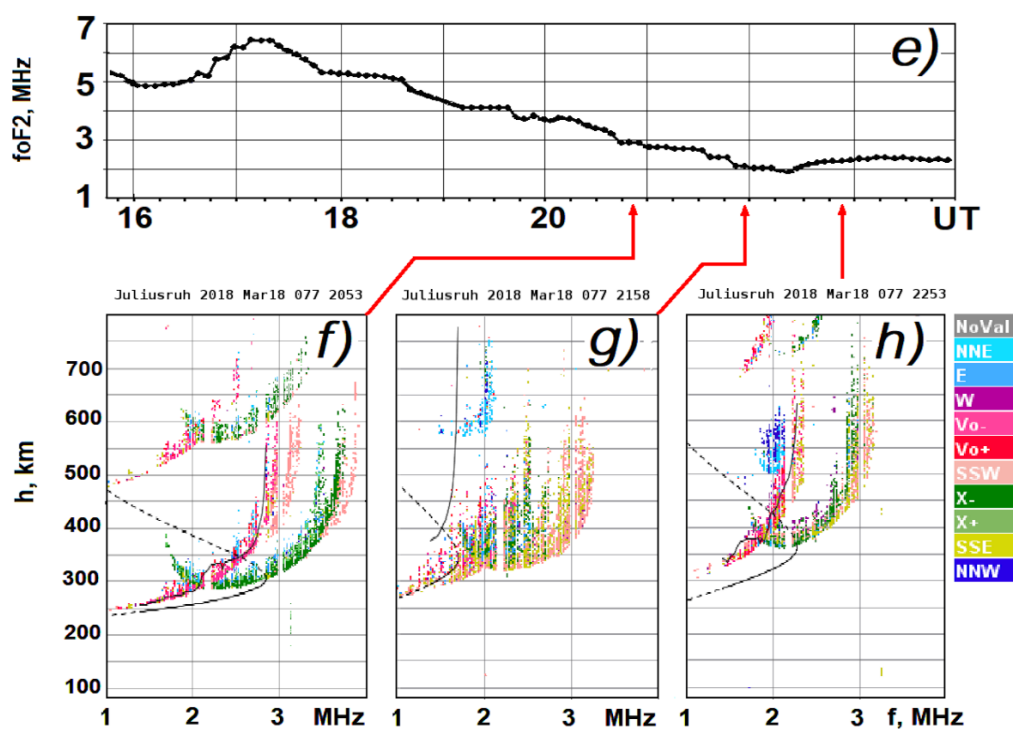


Рисунок 6 — Изменение критической частоты ($foF2$). (f–i) — Ионограммы станции JR055, Юлиусрух, иллюстрирующие характеристики, связанные с ПД.

В четвертой Главе представлен результат анализа параметров ПД во время экстремальных геомагнитных событий и, в частности, во время экстремальной геомагнитной Бури Победы 10–12 мая 2024 года. В разделе 4.1 представлено краткое описание последних экстремальных геомагнитных бурь и их влияния на ионосферную плазму. Проявления ПД во время геомагнитной Бури Победы рассмотрены подробно в разделе 4.2. Далее в разделе 4.3 представлены результаты анализа большого объема измерений параметров ПД спутниками DMSPF-14 и F-16 во время основных экстремальных геомагнитных бурь 21 века (Рисунок 7) с помощью специально разработанного полуавтоматического алгоритма. Это позволило сравнить поведение и характерные свойства ПД как во время Бури Победы, так и во время других экстремальных геомагнитных бурь, а также для сравнения во время средней геомагнитной активности.

В разделе 4.4 приведено обсуждение полученной статистики, а выводы представлены в разделе 4.5. 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 7 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 7 в минимуме Dst экстремальных геомагнитных бурь ПД либо не обнаруживается, либо обнаруживается заметно менее интенсивный. Кроме того, данные, приведенные на Рисунке 8, свидетельствуют о наличии антикорреляции между скоростью и шириной ПД, что интерпретируется как признак магнитосферного источника ПД («генератор напряжения» или «короткое замыкание»). Согласно собранной статистике в представленном диссертационном

исследовании, отсутствует прямая зависимость как скорости и ширины ПД, так и частоты появления ПД от уровня геомагнитной активности, что противоречит текущей научной парадигме природы ПД. Во время более слабых бурь, таких как Буря Святого Патрика и Октябрьская буря средняя скорость ПД выше, чем во время более сильных бурь — Бури Победы, Хэллоуинской бури и Ноябрьской бури. Также, ПД с высокой средней скоростью (3037 м/с) обнаружен во время средней геомагнитной активности 20 апреля 2018 года (минимальный Dst = -78 нТл). Таким образом, показано, что во время Бури Победы скорость ПД ниже, чем во время умеренных магнитных возмущений. Это связано с особенностями развития данного экстремального события, приводящими к нарушениям механизмов генерации ПД вследствие подвижности плазмопаузы/аврорального овала, что не позволяет сформировать устойчивый западный дрейф плазмы.

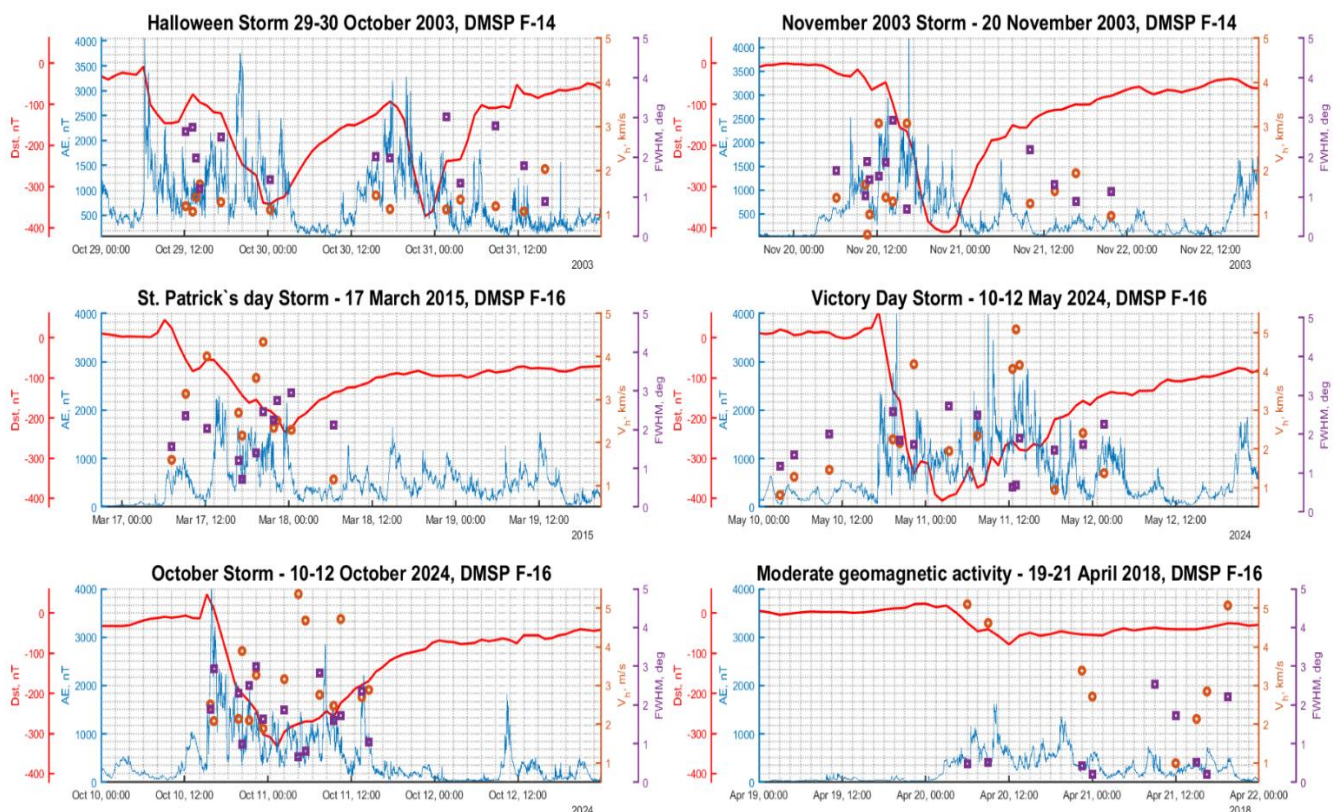


Рисунок 7 — Пиковая скорость горизонтального дрейфа ионов внутри ПД (красные круги) и полуширина ПД (фиолетовые квадраты) во время экстремальных геомагнитных бурь: Буря на Хэллоуин 29–30 октября 2003 года (а), Ноябрьская буря 20 ноября 2003 года (б), Буря Святого Патрика 17 марта 2015 года (с), Буря 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 заключении представлены основные результаты диссертационной работы:

Впервые внутри ПД обнаружены неоднородности температуры и концентрации электронов с пространственными размерами вплоть до сотен метров. Установлено, что с развитием геомагнитной активности флуктуации параметров плазмы внутри ПД увеличиваются на всех масштабах, при этом возрастает роль крупномасштабных эффектов. Определена скорость уменьшения геомагнитной широты ПД во время геомагнитной активности в зависимости от местного магнитного времени.

Обнаружен новый тип явлений — стратифицированный ПД, состоящий из нескольких мелкомасштабных страт ПД. Крупные страты имеют размер 0.2° – 0.3° широты, мелкие страты имеют размер $<0.1^{\circ}$. Стратифицированный ПД состоит из 2–4 крупных страт и от нескольких единиц до нескольких десятков мелких страт. Страты электронной температуры не всегда пространственно совпадают со стратами электронной концентрации и бывают сдвинуты по широте. Показано, что неоднородности температуры электронов внутри страт ПД более выражены, чем неоднородности электронной концентрации.

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. Провал электронной концентрации, связанный с развитием ПД в субавроральной ионосфере, наблюдается на локальных картах полного электронного содержания. Показано, что страты ПД и плазменные неоднородности внутри них могут вызывать множественные переотражения радиосигнала, что проявляется на ионограммах в виде F-рассеяния.

Показано, что во время экстремальной геомагнитной бури в мае 2024 года скорость ПД 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. Установлено, что во время экстремальных бурь ПД чаще наблюдается на стадии развития геомагнитной бури, чем в максимуме геомагнитной активности.

Итоги выполненного диссертационного исследования подчеркивают важность учета такого ионосферного явления как ПД при численном моделировании ионосферной плазмы в теоретических и практических применениях. Также следует в дальнейшем при исследовании ПД учитывать его внутреннюю мелкомасштабную структуру и другие его обнаруженные или уточненные особенности, представленные в данной диссертационной работе. ПД остается одним из наиболее перспективных направлений исследования в ионосфере Земли. Продолжение изучения внутренней структуры ПД 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 ПД на распространение радиоволн в ионосфере. Изучение поведения параметров

поляризационного джета во время экстремальных геомагнитных бурь также представляет интерес, особенно в максимуме солнечного цикла, как правило, богатого на мощные геомагнитные события. Разработка и запуск отечественных и зарубежных космических миссий, оборудованных приборами для исследования ионосферы, в частности приборами для измерения ионных дрейфов, а также развитие сетей наземных измерительных средств, позволило бы значительно продвинуться в вопросе исследования ПД.

Автор выражает благодарность научному руководителю кандидату физико-математических наук, доценту НИУ ВШЭ 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., Чугунин Д. В., Милох В. Я., Могилевский М. М.** 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., Чугунин Д. В., Милох В. Я., Могилевский М. М.** 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., Oinats, A. V., Clausen, L. B. N., Miloch, W. J., Nishitani N., Mogilevsky M. M.** 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., Clausen L. B. N., Miloch W. J., Mogilevsky M. M.** 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., Чугунин Д. В., Могилевский М. М., Милох В. Я.** Внутренняя структура поляризационного джета: стратифицированный поляризационный джет // Геомагнетизм и аэрономия. — 2023. — Т. 63, № 6. — С. 764–774. — DOI: 10.31857/S0016794023600333.

6. **Синеви́ч А. А., Чернышов А. А., Чугунин Д. В., Могилевский М. М., Милох В. Я.** 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., Klimenko M. V., Panchenko V. A., Yakimova G. A., Timchenko A. V., Miloch W. J., Mogilevsky M. M.** 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., Chugunin D. V., Jin Y., Miloch W. J. 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., Borchevskina O. P., Timchenko A. V., Efishov I. I., **Sinevich A. A.**, Ryakhovsky I. A., Yakimova G. A., Bessarab F. S., Yankovsky I. S., Chugunin D. V. 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.**, Timchenko A. V., Nosikov I. A., Chugunin D. V., Yankovsky I. S. 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.

Прочие публикации автора.

11. **Sinevich A. A.**, Chernyshov A. A., Pulinets S. A., Chugunin D. V., Mogilevsky M. M. 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.