

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«ВЫСШАЯ ШКОЛА ЭКОНОМИКИ» И ФЕДЕРАЛЬНОЕ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ РОССИЙСКОЙ
АКАДЕМИИ НАУК

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»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
кандидат физико-математических наук, доцент
Чернышов Александр Александрович

Москва — 2026

Оглавление

Словарь терминов.....	4
Введение.....	5
Глава 1. Поляризационный джет и его мелкомасштабная структура.....	13
1.1 Введение к Главе 1.....	13
1.2 Спутниковые инструменты.....	31
1.2.1 Спутник NorSat-1.....	31
1.2.2 Спутниковая система Swarm.....	34
1.2.3 Спутниковая программа DMSP.....	37
1.3 Поляризационный джет 20 апреля 2018 года.....	40
1.3.1 Мелкомасштабная структура по данным NorSat-1.....	43
1.3.2 Сравнение с измерениями Swarm.....	45
1.4 Обсуждение.....	51
1.5 Выводы.....	53
Глава 2. Стратифицированный поляризационный джет.....	54
2.1 Введение к Главе 2.....	54
2.2 Методы анализа мелкомасштабных свойств.....	55
2.2.1 Метод $\Delta N/N$	55
2.2.3 Вейвлет-анализ.....	67
2.3 Обсуждение.....	72
2.4 Выводы.....	76
Глава 3. Влияние поляризационного джета на прохождение радиосигнала.....	77
3.1 Введение к Главе 3.....	77
3.2 Сцинтилляции и потери спутниковых навигационных сигналов.....	81
3.3 Ионозондовые измерения.....	99
3.4 Обсуждение.....	119
3.5 Выводы.....	126
Глава 4. Поляризационный джет во время экстремальных геомагнитных событий.....	127
4.1 Введение к Главе 4.....	127
4.2 Экстремальная геомагнитная буря 10–12 мая 2024 года (Буря Победы).....	129
4.2.1 Геомагнитные условия.....	130
4.2.2 Наземные наблюдения поляризационного джета.....	134
4.2.3 Спутниковые наблюдения поляризационного джета.....	140
4.3 Поляризационный джет во время других экстремальных геомагнитных бурь.....	144

4.3.1 Метод определения параметров поляризационного джета	144
4.3.2 Сравнение параметров поляризационного джета во время экстремальных бурь.....	146
4.4 Обсуждение	153
4.5 Выводы.....	156
Заключение	157
Список литературы	160

Словарь терминов

ГИП: Главный Ионосферный Провал;
STEVE: Strong Thermal Emission Velocity Enhancement;
ПД: Поляризационный Джет;
MLAT: Magnetic Latitude;
MLT: Magnetic Local Time;
SAID: Subauroral Ion Drift;
SAEF: Subauroral Electric Field;
AE: Auroral Electrojet Index;
FAC: Field-Aligned Currents;
DMSP: Defense Meteorological Satellite Program;
SEB: Soft Electron Boundary;
RCPO: Ring Current/Plasmasphere Overlap region;
SAPS: Subauroral Polarization Stream;
SAR: Stable Auroral Red;
Dst: Disturbance storm-time index;
DSRID: Double-peak Subauroral Ion Drift;
m-NLP: Multi-needle Langmuir Probe;
SSUSI: Special Sensor Ultraviolet Spectrographic;
LBHL: Lyman-Birge-Hopfield Long;
SME: SuperMAG Electrojet Index;
UT: Universal Time;
RODI/ROTI: Rate of change of Density Index/Rate of change of TEC Index;
СПД: Стратифицированный Поляризационный Джет;
ГНСС: Глобальная Навигационная Спутниковая Система;
GISTM: GNSS Ionospheric Scintillation and TEC Monitor;
ПЭС: Полное Электронное Содержание;
IPP: Ionospheric Piercing Point;
AACGM: Altitude Adjusted Corrected Geomagnetic coordinates;
PRN: Pseudo-Random Noise;
ВЗ: Вертикальное Зондирование;
ВНЗ: Вертикально-Наклонное Зондирование;
ММП: Межпланетное Магнитное Поле;
КВМ: Корональный Выброс Масс.

Введение

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 её 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, установить их качественные и количественные характеристики (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 сопоставление 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.

Публикации автора по теме диссертации:

1. **Синевич 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. — 2021а. — Т. 7, № 1. — С. 21–33. — DOI: 10.12737/szf-71202103.
2. **Синевич 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. — 2021б. — 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. **Синевич А. А., Чернышов А. А., Чугунин Д. В., Могилевский М. М., Милох В. Я.** Внутренняя структура поляризационного джета: стратифицированный поляризационный джет // Геомагнетизм и аэрномия. — 2023. — Т. 63, № 6. — С. 764–774. — DOI: 10.31857/S0016794023600333.
6. **Синевич 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., Borchevkina 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. — 2025a. — 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. — 2025b. — Vol. 25. — P. ES501. — DOI: 10.2205/2025es001009.

Прочие публикации:

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.

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.

Глава 1. Поляризационный джет и его мелкомасштабная структура

1.1 Введение к Главе 1

Субавроральная ионосфера — область ионосферы Земли в интервале геомагнитных (инвариантных) широт от 50° – 55° до 65° – 70° , которая располагается между проекцией по силовым линиям геомагнитного поля положения плазмопаузы и экваториальной границей аврорального овала (Рисунок 1.1). Ее положение быстро меняется во время геомагнитной активности. Физические явления, происходящие в этой области ионосферы, являются предметом интереса различных исследований. Здесь наблюдаются процессы и явления, отсутствующие или менее выраженные на других широтах, например, формирование Главного Ионосферного Провала (ГИП) в широтном распределении электронной плотности плазмы (Muldrew, 1965); радиоаврора (Котова и др., 2020); формирование полярной стенки провала за счет выпадения низкоэнергичных электронов на экваториальной границе диффузных вторжений (Брюнелли, Намгаладзе, 1988); образование провала легких ионов в верхней ионосфере (Гальперин и др., 1990); появление красных дуг в фоновом свечении верхней атмосферы (Иевенко, Алексеев, 2004; Khalipov et al., 2004), а также такое явление как STEVE (Strong Thermal Emission Velocity Enhancement) (MacDonald et al., 2018).

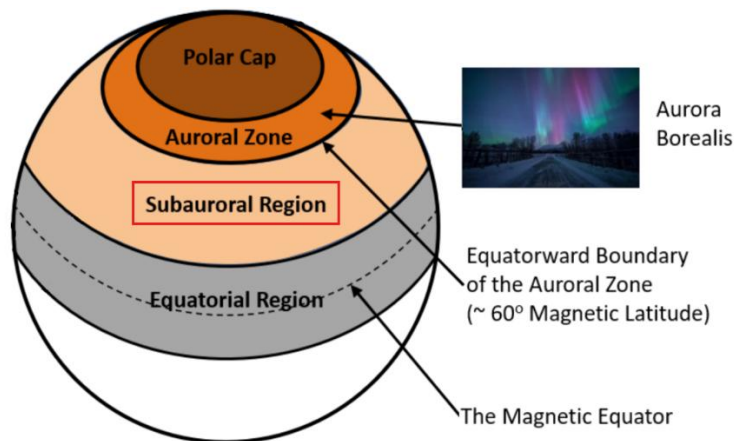


Рисунок 1.1 — Схема ионосферных областей Земли.

Также в этой зоне наблюдаются узкие потоки быстрых субавроральных ионных дрейфов к западу вблизи проекции плазмопаузы на высотах области F-слоя ионосферы, которые наиболее заметно проявляются во время бурь/суббурь на фоне крупномасштабной конвекции плазмы (Foster et al., 1978; Anderson et al., 1991). Впервые такие потоки были зарегистрированы на советском спутнике Космос-184 и получили название «поляризационный джет» (ПД) (Гальперин и др., 1973а, 1973б; Galperin et al., 1974). На $\sim 60^{\circ}$ MLAT (Magnetic LATitude, геомагнитная широта) и ~ 00 MLT (Magnetic Local Time, местное магнитное время),

на экваториальной границе зоны конвекции плазмы на восток, обнаружена узкая, но очень интенсивная (зашкаливающая прибор на борту спутника) полоса дрейфа на запад (Рисунки 1.2–1.3).

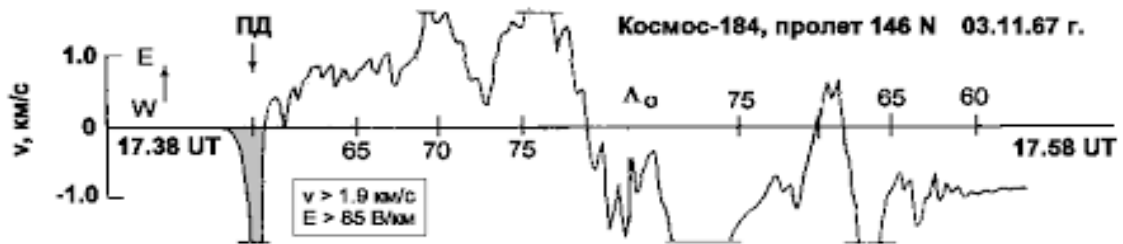


Рисунок 1.2 — Первый случай регистрации ПД по данным спутника «Космос-184». ПД выделен серым цветом (Гальперин и др., 1973а).

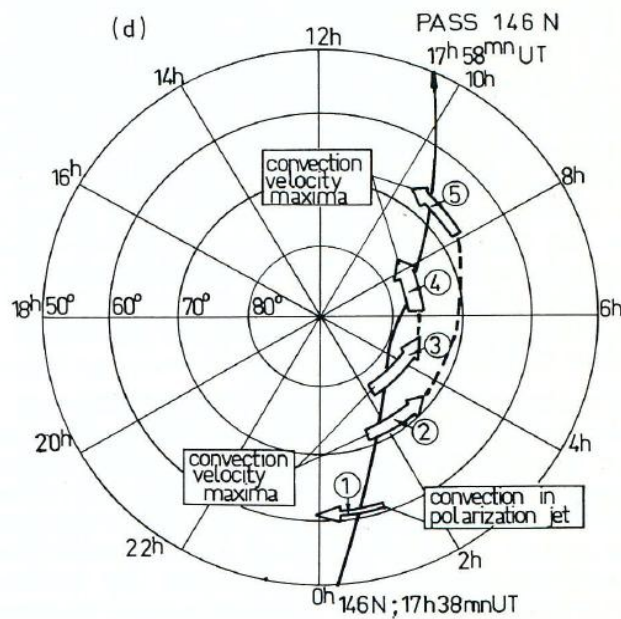


Рисунок 1.3 — Расположение первого случая регистрации ПД в полярных координатах геомагнитная широта-MLT, ПД выделен узкой стрелкой с направлением на запад (Galperin et al., 1974).

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 (AE-C). В результате исследования определено, что ПД возникает от 18

до 02 MLT экваториальнее границы авроральной зоны между 55° и 70° геомагнитной широтой (левая панель Рисунка 1.4). ПД появляется как одиночное явление или в виде нескольких событий, одно из которых почти всегда находится у полярной стенки внутри ГИП. Также рост вероятности возникновения ПД с увеличением индекса аврорального электроджета (Auroral Electrojet, AE index) говорит о зависимости ПД от геомагнитной активности. Ширина полосы ПД, согласно (Spiro et al., 1979), на ионосферных высотах составляет 1° – 2° широты, а скорость дрейфа от ~ 1 км/с и более в западном направлении и регистрируется в вечернем и ночном секторе MLT. Около 85% обнаруженных ПД совпадали с хорошо выраженным ГИП, но только 20% обнаруженных ГИП совпадали с ПД. ГИП представляет собой участок широт на ночной и вечерней стороне в субавроральной зоне (геомагнитные широты 50° – 70°) F-области ионосферы (Muldrew, 1965). Для этого участка характерно заметное снижение электронной концентрации, вызванное тем, что на вечерней стороне в промежутке между областями авроральной конвекции и плазмосферной коротации при отсутствии «подпитки» ионизирующим излучением Солнца образуется область застоя (стагнации плазмы) (Knudsen et al., 1977). Находясь длительное время на неосвещенной стороне Земли, плазма рекомбинирует до сколь угодно низких значений концентрации, определяемых временем, в течение которого плазма не подпитывается источниками ионизации. Глубина провала в электронной концентрации может составлять от 3–5 раз до порядка величины и более. Формы провала разнообразны: от широкой ($\sim 20^\circ$) изрезанной долины до узкого ($< 5^\circ$) глубокого минимума, при этом полярная стенка обычно круче, чем экваториальная (Moffet, Quegan, 1983).

В (Heelis et al., 1976) сообщается о больших локализованных скоростях потока плазмы, направленных на запад, в области вечернего ГИП. С этими результатами согласуются наблюдения, представленные в (Smiddy et al., 1977), где по данным спутника S3-2 изучены несколько впервые обнаруженных случаев возникновения сильных (до 280 мВ/м) локальных, направленных к полюсу электрических полей вблизи ионосферной проекции плазмопаузы в предполуночном секторе MLT. Эти поля были промоделированы следующим образом:

$$E_x = E_0 e^{-\frac{(x-x_0)^2}{a^2}}, \quad (2)$$

где E_x — направленная к полюсу компонента электрического поля; $x - x_0$ — расстояние до максимума электрического поля в точке x_0 ; $a \sim 50$ км — масштабный параметр, взятый за 50 км. Авторы полагают, что эти поля могут быть связаны с взаимодействием между горячей инжектированной плазмой во время суббури и холодной плазмой плазмосферы.

В работе (Karlsson et al., 1998) таким электрическим полям дано название SubAuroral Electric Fields (SAEF) — субавроральные электрические поля. При этом под термином SAEF подразумевается ПД, но проявление его не в виде ионных дрейфов, а в виде направленных к полюсу электрических полей. В этой статье приведен анализ 14 месяцев измерений

электрических полей на спутнике Freja. Обнаруженные авторами SAEF располагались от 18 до 02 MLT с максимумом как по частоте появления и по интенсивности около 22 MLT (правая панель Рисунка 1.4), что согласуется с результатами (Spiro et al., 1979). Замечено, что динамика расположения SAEF в геомагнитных координатах от геомагнитной активности совпадает с такой динамикой у ГИП. Предложена простая модель электрического поля SAEF:

$$E_x(x) = \frac{J_P}{\Sigma_P(x)}, \quad (3)$$

$$\Sigma_P(x) = \Sigma_{P,BG} - (\Sigma_{P,BG} - \Sigma_{P,min})e^{-x^2/b^2}, \quad (4)$$

где J_P — ток Педерсена; $\Sigma_{P,BG}$ — фоновая интегрированная по высоте проводимость Педерсена; $\Sigma_{P,min}$ — минимум интегрированной по высоте проводимости Педерсена; x — расстояние до минимума проводимости (то есть до максимума поля); b — масштабный параметр, аналогичный a из (2). Авторы (Karlsson et al., 1998) поддерживают механизм генерации ПД, представленный в (Anderson et al., 1993), о котором пойдет речь ниже.

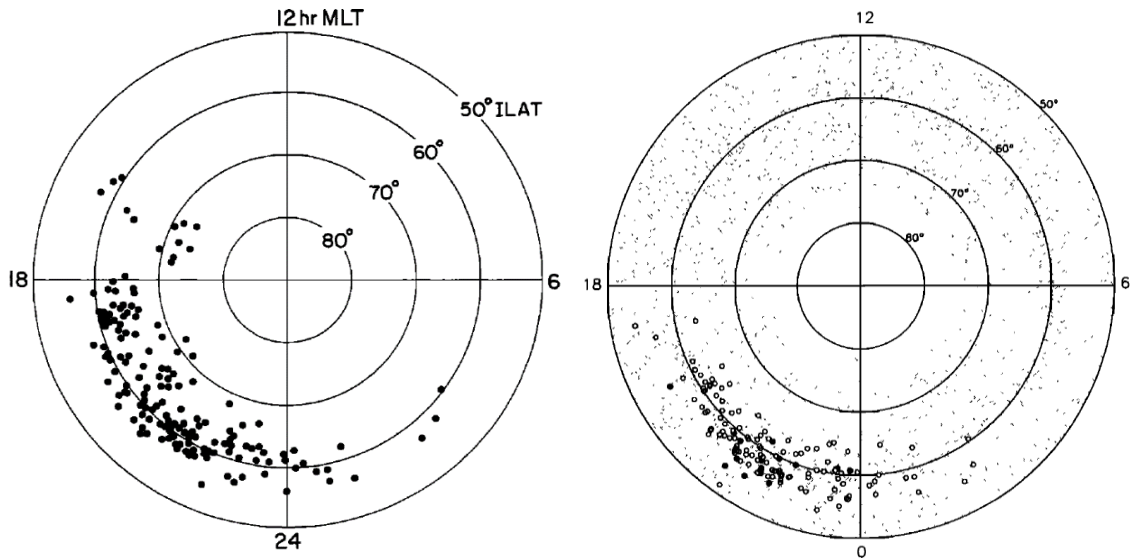


Рисунок 1.4 — Левая панель — Распределение случаев обнаружения ПД по данным спутника AE-C в полярных координатах MLAT-MLT (Spiro et al., 1979). Правая панель — Распределение случаев обнаружения субавроральных электрических полей (SAEF) по данным спутника Freja (Karlsson et al., 1998).

В дальнейшем, с помощью данных спутников AE-C и Dynamic Explorer 2 (DE-2) проведено исследование влияния ПД на ионное содержание F-области ионосферы, связь ПД с ГИП и его эволюцию во времени. Результаты этого исследования приведены в статье (Anderson et al., 1991). Согласно исследованию, на высотах вблизи пика плотности ионосферного F-слоя в областях с большим дрейфом ионов, где концентрация O^+ значительно снижена, а концентрация NO^+ повышена, образуется глубокий провал ионизации, в то время как на больших высотах (>700 км) провал значительно меньше или даже отсутствует. Показано, что в

большинстве случаев ГИП присутствовал до появления ПД, и что в случае возникновения ПД ГИП стал более выраженным у его полярной стенки. В (Anderson et al., 1991) также замечено, что ПД длится дольше 30 минут, но менее трех часов, и их широта часто уменьшается с течением времени. Однако в более современных статьях, например в (Степанов и др., 2024), сообщается о наблюдении по данным ионосферной цепочки в Якутске времени жизни ПД вплоть до 12 часов. К полюсу от ПД поток плазмы в среднем идет на запад по всей авроральной зоне в вечерних секторах MLT, а в полуночных — на восток.

Связь между ПД и фазами геомагнитной активности была исследована по данным спутников Dynamics Explorer 1 (DE-1) и DE-2 (Anderson et al., 1993). С помощью полученных DE-1 изображений авроральных свечений и наблюдений высыпаний частиц с геосинхронной орбиты, авторы работы определили момент начала взрывной фазы суббури и момент начала фазы восстановления. Авторы (Anderson et al., 1993) утверждали, что ПД обычно возникает после начала суббури (через >30 минут) во время фазы восстановления. Кроме того, в данной статье предложен физический механизм возникновения ПД, названный «генератором тока» («current generator»), диаграмма, описывающая который, представлена на Рисунке 1.5. Нисходящие ($R2, J_{\parallel}^{\downarrow}$) зоны «2» и восходящие ($R1, J_{\parallel}^{\uparrow}$) зоны «1» продольные токи (FAC, Field-Aligned Currents) замыкаются в ионосфере током Педерсена. Токи FAC R2 обусловлены высыпаниями ионов экваториальные 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 Σ_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. Причем основной механизм потерь в ночной ионосфере — взаимодействие ион-атом



и последующая диссоциативная рекомбинация



при сильном ионном дрейфе недостаточно быстро снижают электронную концентрацию для образования наблюдаемого «провала-в-провале», связанного с ПД. Это говорит о том, что, помимо столкновений с разогретыми нейтральными частицами, действуют дополнительные механизмы потери электронной концентрации (Anderson et al., 1991). Данное снижение концентрации происходит на ночной стороне субавроральной области, где отсутствуют какие-либо значительные механизмы восстановления плазмы. Таким образом, проводимость

Педерсена сильно снижена в области ионосферного провала, что при сохранении плотности тока замкнутых в ионосфере FAS, вызывает значительное усиление направленного к полюсу электрического поля E , что в свою очередь приводит к возникновению направленного на запад электрического дрейфа ($E \times B$ дрейф).

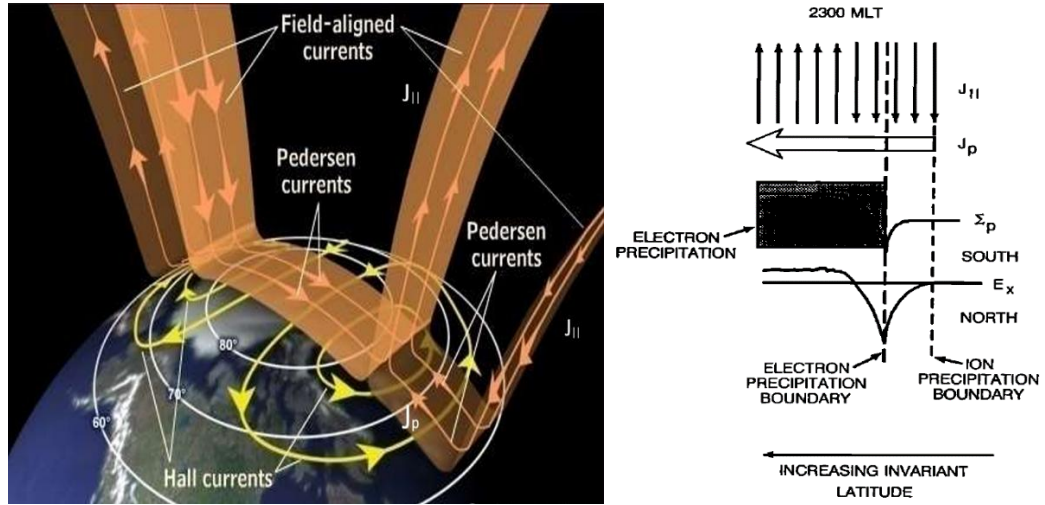


Рисунок 1.5 — Левая панель — Схематичная иллюстрация токовой системы высоких широт. Левая панель — Механизм возникновения ПД, названный «генератор тока» (Anderson et al., 1993).

Ранее, до того, как был предложен механизм «генератор тока», было распространено представление о том, что ПД возникает под влиянием так называемого «генератора напряжения» в магнитосфере. Этот механизм был первым из предложенных механизмов возникновения ПД и представлен в статье (Southwood, Wolf, 1978) и затем доработан в (Galperin, 2002) (Рисунок 1.6). Высыпающиеся из хвоста магнитосферы энергичные ионы проникают на более низкие L-оболочки (L-параметр МакИлвейна — это геомагнитная координата, описывающая положение точки в магнитосфере Земли, равная расстоянию в радиусах Земли (R_e) от центра Земли до вершины силовой линии, пересекающей данную точку (McIlwain, 1961)) из-за сохранения первых двух адиабатических инвариант в присутствии утрово-вечерней компоненты электрического поля вдоль траектории. Таким образом, получается, что ионы заходят глубже, чем электроны, что создает электрическое поле наружу от Земли (Southwood, Wolf, 1978):

$$E_L = - \left(1 + \left(\frac{L_2}{L} \right)^2 \right) C e^{i\phi}, \quad (7)$$

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

$$E_L \simeq -2C e^{i\phi}, \quad (8)$$

$$C \sim \frac{2\Sigma_{p2}(-iE)}{(\Sigma_{p1} + i\Sigma_{h12})(1 - L_2^2 L_1^{-2})}, \quad (9)$$

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

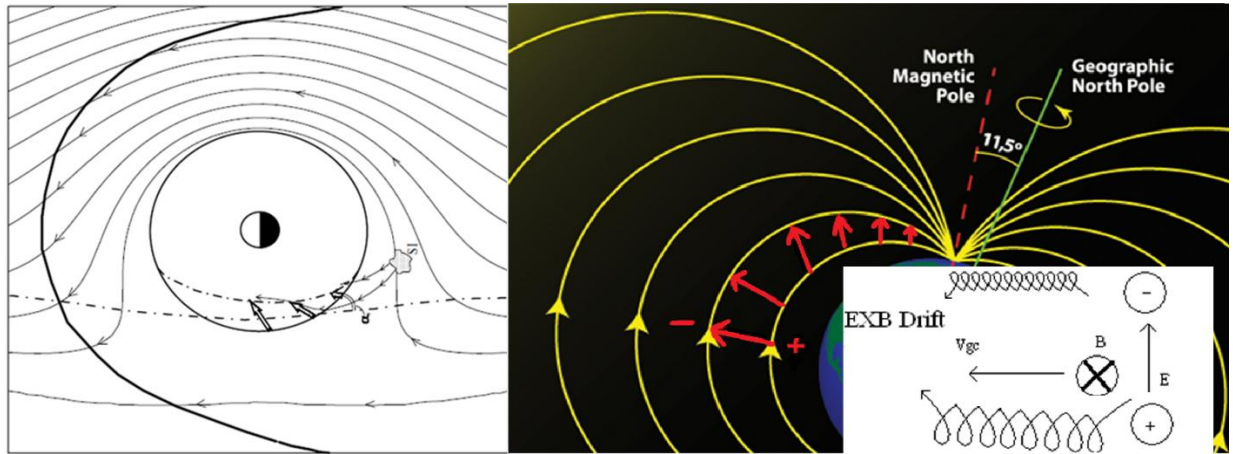


Рисунок 1.6 — Механизм возникновения ПД, названный «генератор напряжения» (Southwood, Wolf, 1978; Galperin, 2002).

В работах (Деминов, Шубин, 1987, 1988) предложили механизм, в котором проводимость ионосферы в субавроральной области непосредственно изменяется под воздействием FAC. FAC преимущественно переносятся электронами, в то время как на высотах ионосферы они замыкаются токами Педерсена, которые в основном переносятся ионами. Затем электрическое поле подстраивается под измененную проводимость, создаваемую этими токами. Однако авторы обнаружили, что наибольший эффект наблюдается в вечерних секторах, а в полноточных секторах эффект незначительный, что противоречит наблюдениям (Anderson et al., 2001).

В статьях (de Keyser et al., 1998; de Keyser, 1999) была предложена модель, в которой ПД рассматривается как результат взаимодействия горячей инжектированной и холодной ионосферной плазмы. Согласно этому подходу, с учетом тангенциального разрыва, электрическое поле возникает из-за разницы гирорадиусов для горячих инжектированных ионов, инжектированных электронов и холодной ионосферной плазмы на границе плазмосферы. Следовательно, в этой модели ПД должен иметь ширину порядка разности гирорадиусов холодных и горячих протонов (~ 30 км на экваторе или 0.02° широты на $L = 4$ на высоте 300 км). Из наблюдений известно, что размер «классического» ПД значительно больше (Spiro et al., 1979), и основные положения модели вращательного разрыва не подтверждаются данными, как показали (Burke et al., 2000) и (Mishin et al., 2010). Кроме этого, (Burke et al., 2000)

сообщают об одновременном обнаружении ПД на разных долготах и о его геомагнитной сопряженности между полушариями.

Далее в работе (Anderson et al., 2001) было проведено первое магнитно-сопряженное исследование ПД в ионосфере по измерениям спутников DMSP (Defense Meteorological Satellite Program, программа оборонных метеорологических спутников) F-8–F-14 (высоты орбит ~850 км) и в магнитосфере по измерениям спутника Akebono (высота ~9000 км). Авторы обнаружили, что ПД появляется одновременно на большом интервале MLT от 16 до 24 MLT. Также обнаружено, что интенсивность ПД связана с распределением проводимости в ионосфере, внутри ГИП и вдоль силовых линий FAC R2, что было интерпретировано как подтверждение теории о том, что магнитосфера работает как «генератор тока» при возникновении ПД. При этом уточняется, что механизм «генератор тока», для которого нужны мощные буревые FAC R2 работает только в самом начале, при «запуске» ПД, далее электрическое поле ПД продолжает поддерживаться изменениями в проводимости ионосферы, внесенными в нее током Педерсена, что объясняет случаи обнаружения ПД на фазе восстановления бури.

На основании наблюдений спутника Astrid-2 в (Figueiredo et al., 2004) высказана идея, о том, что антикорреляция между шириной и максимумом интенсивности структур ПД с развитием геомагнитной активности указывает на магнитосферный источник ПД, представляющий собой генератор постоянного напряжения. Однако анализ рассчитанных профилей проводимости Педерсена, интегрированных по высоте, ясно показал, что события ПД связаны с уменьшением ионосферной проводимости, при этом наиболее интенсивные пики электрического поля связаны с наименьшими минимальными значениями проводимости, что соответствует магнитосферному генератору тока. Таким образом, по мнению авторов, ПД не может быть создан только «генератором напряжения» или только «генератором тока», а его возникновение содержит признаки обоих механизмов и далее его существование поддерживается механизмами ионосферной обратной связи.

В статье (Puhl-Quinn et al., 2007) представлены результаты еще одного магнитно-сопряженного исследования ПД — в магнитосфере по измерениям спутника Cluster у магнитного экватора около $4.3 R_e$ и в ионосфере по измерениям DMSP F-13–F-16 на высотах ~850 км (Рисунок 1.7). Проецирование координат вдоль силовых линий магнитного поля проводилось с использованием модели Цыганенко (Tsyganenko, 2002a, 2002b). Авторы сообщают, что внешняя (полярная) граница полосы ПД совпадает с плазмопаузой, а внутренняя (экваториальная) — с границей высыпаний мягких электронов (SEB — soft electron boundary (Galperin et al., 1998)). Таким образом, полоса ПД лежит «внутри» плазмосферы, в области RCPO (Ring Current/Plasmasphere Overlap region — область перекрытия внутреннего края

кольцевого тока и плазмосферы) в магнитосфере. Канал ПД в (Puhl-Quinn et al., 2007) промоделирован как статическая структура. Непрерывность ионосферного тока

$$\nabla \cdot \mathbf{j} = 0, \quad (10)$$

в сочетании с интегрированным по высоте законом Ома для ионосферы и предположением отсутствия параллельного тока, вытекающего из нижней части ионосферы дает:

$$j_{\parallel}^{top} = \pm \nabla_{\perp} \cdot (\Sigma_P \mathbf{E}_{\perp} - \Sigma_H \mathbf{E}_{\perp} \times \hat{b}) \quad (11)$$

для параллельного тока, входящего (выходящего из) в высокоширотную ионосферу. Знак плюс (минус) относится к Северному (Южному) полушарию, а Σ_P (Σ_H) — интегрированная по высоте проводимость Педерсена (Холла). $\hat{b}$ — единичный вектор вдоль вектора магнитного поля. Ток, направленный вдоль силовых линий поля, также связан с магнитными вариациями посредством закона Ампера:

$$j_{\parallel} = \frac{1}{\mu_0} (\nabla \times \Delta \mathbf{B})_{\parallel}, \quad (12)$$

где $\Delta \mathbf{B}$ — возмущение магнитного поля, которое, как предполагается, отвечает за $j_{\parallel}$. Используя систему координат, предложенную авторами и созданную на основе модели IGRF-90 (International Geomagnetic Reference Field, международное геомагнитное аналитическое поле (Alken et al., 2021)), и полагая

$$\mathbf{E}_{\perp} = E_x \hat{x}, \quad (13)$$

а также пространственную вариацию полей преимущественно в направлении $\hat{x}$ (тонкий по широте и широкий по долготе канал, вытянутый вдоль L-оболочки), при объединении (11) и (12) в южном полушарии получается (Puhl-Quinn et al., 2007):

$$\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial (\Delta B_z)}{\partial x} = - \frac{\partial}{\partial x} (\Sigma_P E_x). \quad (14)$$

В этом статическом случае непрерывность электрического тока требует, чтобы горизонтальный (поперек L-оболочки) градиент азимутального возмущения магнитного поля в высокоширотной ионосфере уравнивался горизонтальным градиентом произведения электрического поля, направленного к полюсу, и проводимости Педерсена. В отсутствие горизонтальных градиентов проводимости (то есть предполагая, что Σ_P не является функцией x), градиенты электрического поля на краях канала ПД поддерживались бы исключительно парой противоположно направленных токовых слоев, ориентированных вниз в ионосферу на экваториальной границе и вверх из ионосферы на полярной границе, что противоречит измерениям DMSP F-16. Авторами предполагается, что пара FAC формирует канал ПД. Со временем, по мере развития процесса магнитосферно-ионосферной обратной связи, изменения ионосферной проводимости и, предположительно, развития градиентов, эта парная структура FAC больше не требуется для поддержания канала электрического поля. Это согласуется с результатами (Anderson et al.,

2001), а также с утверждением (Figueiredo et al., 2004) о том, что ПД содержит признаки как «генератора напряжения», так и «генератора тока».

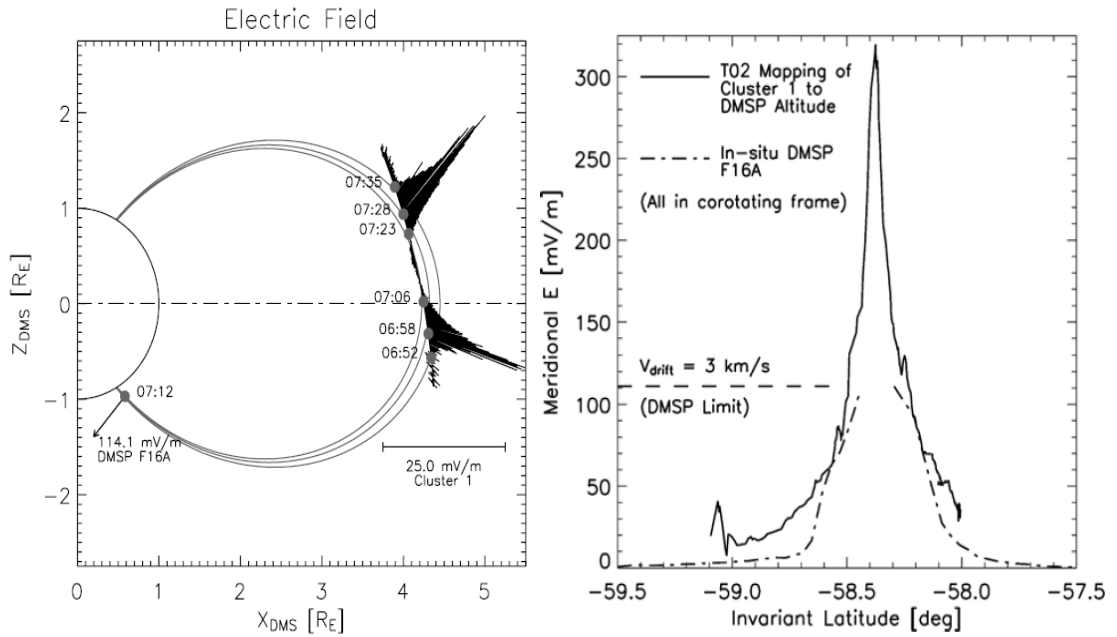


Рисунок 1.7 — Левая панель — Магнитно-сопряженные измерения направленных к полюсу электрических полей на спутниках Cluster и DMSP (Puhl-Quinn et al., 2007). Для DMSP поле E_x рассчитано из измерений дрейфметра по формуле (1). Правая панель — наложение измерений Cluster и DMSP путем проецирования вдоль силовых линий магнитного поля по модели Цыганенко (Tsyganenko, 2002a, 2002b).

Работа (Mishin, Puhl-Quinn, 2007) является продолжением исследования ПД по измерениям DMSP/Cluster, начатого в (Puhl-Quinn et al., 2007). Авторы подтверждают результаты (Puhl-Quinn et al., 2007). Кроме того, они сообщают о том, что ток $J_{\parallel}$ внутри канала ПД, в основном вблизи его внешней (полярной) стороны, концентрируется вблизи максимумов концентрации ионов. Эти токи, по-видимому, никогда не замыкаются в центре полосы ПД. Пики E_x совпадают либо с пиком в концентрации ионов (n_i), либо лежат на внешней стенке провала. Эти особенности противоречат соотношению $J_{\parallel}-n_i-E_x$ «генератора тока». В свою очередь, расстояние между внутренними краями высыпаний электронов и ионов и значение пика E_x противоположны механизму «генератор напряжения», поскольку согласно уравнениям (7–8) при уменьшении расстояния E_x должно увеличиваться, а по их измерениям наблюдается обратная ситуация. В (Mishin, Puhl-Quinn, 2007) взамен указанным выше механизмам предлагается механизм, называемый «короткое замыкание» («short-circuiting»). Поток горячей плазмы (плазмойд) после пересоединения в хвосте магнитосферы с плотностью n_h и температурой T_h и массой ионов m_h , движущийся поперек магнитного поля B , может поддерживать свое движение к Земле со скоростью V (Schmidt, 1960), даже если

$$n_h(T_h + m_h V^2) \ll B^2/8\pi. \quad (15)$$

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. Автор статьи (Rozhanskii, 1986) описывает движение плазмоида, инжектированного в ионосферу, с помощью уравнений квазинейтральности и замыкания поперечных ионных и продольных электронных токов

$$J_{\parallel} = \frac{-\omega_p^2}{4\pi\nu} \delta E_{\parallel}, \quad (16)$$

где ω_p — плазменная частота в системе СГС:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi n_0 e^2}{m}}, \quad (17)$$

где n_0 — фоновая концентрация плазмы,

$$\delta E = -\nabla\Phi. \quad (18)$$

Несмотря на то, что строгое решение найдено не было, в (Rozhanskii, 1986) показано, что эффект короткого замыкания незначителен до тех пор, пока параметр

$$A = \frac{n_h}{n_0} \quad (19)$$

превышает критический параметр A_c :

$$A_c = \frac{n_h}{n_c} \simeq \sqrt{\frac{4m_i V}{m\nu a}}, \quad (20)$$

где a — размерность вектора $\mathbf{Y}$ (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 $\mathbf{B}$. 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 (в области RCPO). Электрическое поле этого слоя проецируется на ионосферу в виде полосы ПД (Рисунок 1.8). Этот узкий слой в области RCPO впоследствии в работе (Mishin et al., 2010) был назван «турбулентный плазмосферный пограничный слой» (TPBL, Turbulent Plasmaspheric Boundary Layer), поскольку в нем наблюдаются нижнегибридная и быстрая магнитозвуковая турбулентность, которая создает аномальную магнитную диффузию:

$$v_e \simeq \frac{\omega_{pe}^2}{\omega_{ce}} \sqrt{\frac{10m_i}{\pi m_e} \frac{\tilde{E}^2}{8n_0 T_i}}, \quad (21)$$

где T_i — температура холодных ионов; $\tilde{E}$ — среднеквадратичная амплитуда.

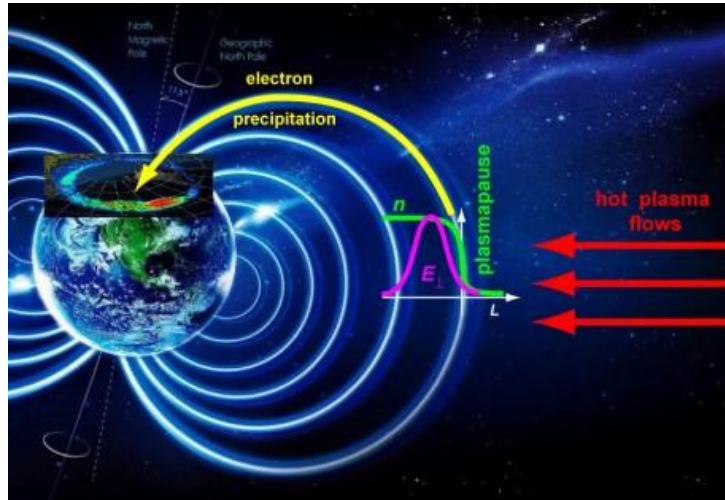


Рисунок 1.8 — Механизм возникновения ПД, названный «короткое замыкание» (Mishin, Puhl-Quinn, 2007; Mishin, 2013).

Несмотря на наличие большого количества работ на эту тему в научной литературе, конкретный механизм генерации ПД на сегодняшний день не определен. Возникновение ПД может быть объяснено как одной из теорий, так и некой комбинацией нескольких. Работы в данном направлении продолжаются.

С момента открытия в субавроральной области ионосферы ПД, в вечернем секторе (<20 MLT) в субавроральной области ионосферы были обнаружены также широкие потоки ионных дрейфов (Yeh et al., 1991). В марте 2002 года в обсерватории Хейстэк Массачусетского технологического института был проведен семинар, на котором обсуждались характеристики, причины возникновения и эффекты субавроральных электрических полей. На семинаре было решено, что для описания областей электрического поля и конвекции плазмы в субавроральной ионосфере необходим единый термин. Новое название области — SAPS (Subauroral Polarization Stream, субавроральный поток поляризации), а также ее исследование были представлены в статье (Foster, Burke, 2002). Таким образом, были объединены два вида наблюдений субавроральных электрических полей: узкие полосы дрейфа ионов (ПД) и широкие области ионосферной конвекции к западу с большими скоростями, а также связанные с ними электрические поля, под одним названием SAPS, тем самым подразумевая, что механизмы их формирования, по-видимому, являются одинаковыми. Исследование проводилось с помощью измерений радара некогерентного рассеяния Millstone Hill и одновременного пролета спутника DMSP F-13 12 апреля 2001 года во время повышенной геомагнитной активности (Kp 7+), результаты измерений авторов исследования приведены на Рисунке 1.9 (Foster, Vo, 2002).

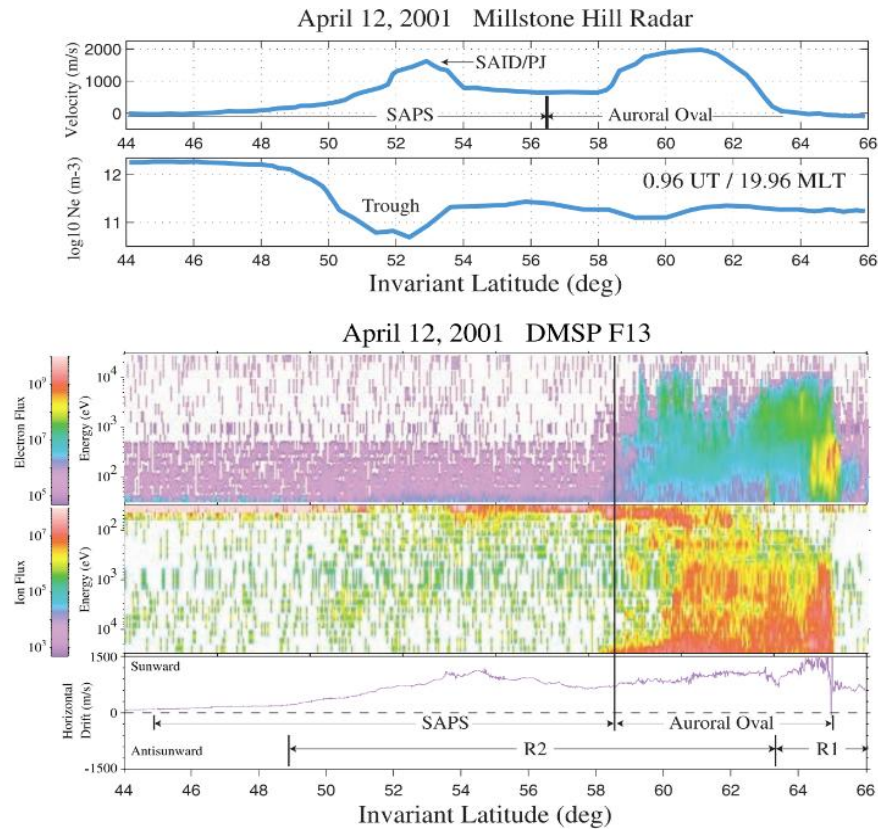


Рисунок 1.9 — Одновременные измерения радара некогерентного рассеяния Millstone Hill и спутника DMSP F13 (Foster, Vo, 2002).

Ширина SAPS в этот рассмотренный момент времени составляет $\sim 10^\circ$, а его центр приходится на $\sim 53^\circ$ геомагнитной широты, что экваториальнее границы высыпаний электронов аврорального овала на 5° , скорость дрейфа плазмы на запад в этой области достигает 1 км/с. Предполагается, что внутри SAPS, в области, где пик скорости дрейфа приблизительно совпадает с провалом электронной концентрации, расположен ПД.

В субавроральной ионосфере наблюдается такое оптическое явление как SAR-дуга (Stable Auroral Red) (Рисунок 1.10), представляющее собой красное излучение (640 нм), появляющееся в ночном небе субавроральных широт в виде полосы, протянутой вдоль широты от закатного до рассветного терминатора (Barbier, 1958; Cornwall et al., 1971; Craven et al., 1982; Kozyra et al., 1997). Существует несколько предположений о природе возникновения этого явления. Красное свечение может быть связано с эффектами нисходящего потока тепла вблизи плазмопаузы и внутреннего края популяции частиц кольцевого тока (Hoch, Lemaire, 1975). Высыпания низко-энергичных частиц во время геомагнитных возмущений также может вносить вклад в уровень излучений благодаря Кулоновским столкновениям (Kozyra et al., 1987; Slater et al., 1987). Однако моделирование излучения на основе наблюдаемых параметров ионосферы не позволило получить наблюдаемые уровни излучения, что позволяет предположить возможность наличия небольшого компонента, вызванного высыпаниями. В статье (Foster et al., 1994) высказано предположение о связи SAR-дуги с ПД, поскольку данные

явления зачастую совпадают как во времени, так и в пространстве. Результаты (Afonin et al., 2000), а также (Khalipov et al., 2000, 2018; Иевенко, Парников, 2020) подтвердили это предположение.

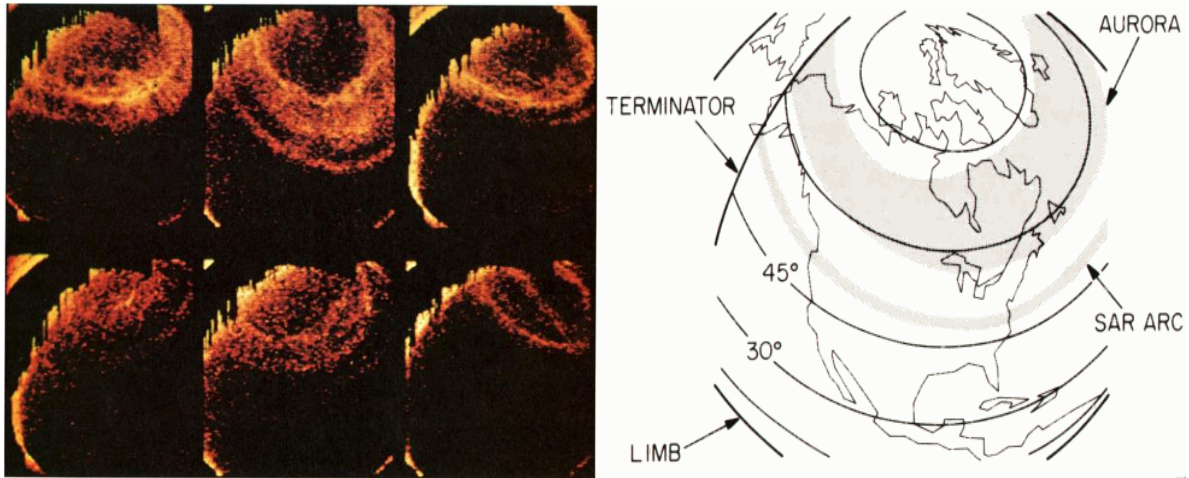
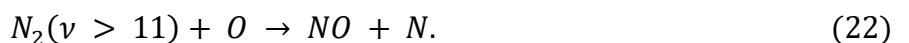


Рисунок 1.10 — Левая панель — снимки Земли с SAR-дугой в фильтре 630 нм со спутника DE 1. Правая панель — Диаграмма, интерпретирующая снимки с левой панели (Craven et al., 1982).

Помимо SAR-дуги, с ПД ассоциируется такое оптическое явление субавроральной ионосферы как STEVE (Рисунок 1.11). В статье (MacDonald et al., 2018) было впервые в научной литературе освещено появление движущихся на запад светящихся бело-фиолетовых полос, названных впоследствии STEVE в ночном небе на высоте ~ 180 км и на широтах экваториальнее аврорального овала, то есть в субавроральной области ионосферы ($\sim 65^\circ$ геомагнитной широты). Расположение STEVE экваториальнее границы высыпаний электронов говорит о том, что данное явление имеет механизм генерации, отличный от авроральных сияний, а бело-фиолетовый спектр излучения — о том, что оно не является разновидностью SAR-дуги. В этой статье также описывается исследование, показывающее на основе данных измерений спутника Swarm A частое пространственное и временное совпадение STEVE с ПД. Первые изображения STEVE представляют собой фотографии местных жителей и фотографов-любителей, поскольку пик солнечной активности в 2014 году совпал с началом широкого распространения среди населения мощных цифровых фотоаппаратов и смартфонов с камерами высокого разрешения. Спектрографические измерения показывают, что спектр STEVE состоит из двух основных компонент — общего усиления непрерывного спектра в диапазоне от 400 до 730 нм и пика около 630 нм (Gillies et al., 2019). В статье (Harding et al., 2020) предложен механизм, объясняющий физическую и химическую природу STEVE и его связь с ПД. Идея этого механизма состоит в том, что быстро движущиеся на запад ионы внутри ПД сталкиваясь с молекулами N_2 , возбуждают их до высокого колебательного числа ($v > 11$). Возбужденные молекулы N_2 взаимодействуют с атомами O:



Рожденные в результате молекулы NO производят белый свет вследствие реакции:



Данный механизм требует минимум ~ 3 эВ энергии, что эквивалентно 4.4 км/с для NO^+ (доминирующий ион в ПД). Таким образом, механизм также объясняет, почему STEVE наблюдается во время наиболее сильных ПД: измеренные скорости ионов в ПД, совпадающих с STEVE, лежат в пределах от 3.9 до 5.5 км/с, в то время как типичная скорость ионов в ПД ~ 1.3 км/с. Изучению STEVE (Gallardo-Lacourt et al., 2018, 2021) и его связи с ПД (Archer et al., 2019; Nishimura et al., 2020; Mishin, Streltsov, 2023) посвящено множество работ и в данный момент исследования продолжаются (Баишев и др., 2026).



Рисунок 1.11 — Фиолетовая субавроральная дуга, названная STEVE — фотография, сделанная на камеру Nikon D810 с выдержкой в 4 с (MacDonald et al., 2018).

Дуги SAR и STEVE могут развиваться в непосредственной близости по времени и в пространстве (Chu et al., 2019; Liang et al., 2019; Martinis et al., 2021). Но посредством динамического перехода SAR-дуга может превратиться в STEVE (Martinis et al., 2022; Parnikov et al., 2022; Gillies et al., 2023). Это означает, что SAR-дуги и STEVE являются проявлениями связанной системы магнитосферы-ионосферы-термосферы (М-И-Т) (Nishimura et al., 2023; Horvath, Lovell, 2024) и что магнитосфера играет решающую роль в создании благоприятных условий для короткого замыкания (Svaldi et al., 2023; Mishin, Streltsov, 2024). Благоприятные условия в магнитосфере создаются резкой плазмопаузой и связанными с ней градиентами концентрации и температуры плазмы, а также сильным сдвигом потока, происходящим на плазмопаузе между горячей плазмой плазменного слоя и холодной плазмой плазмосферы (Chu et al., 2019; Gillies et al., 2020).

ПД и SAPS наблюдались и исследовались по данным со спутников, измерениям цепочки наземных ионосферных станций и станций некогерентного рассеяния радиосигналов (Anderson

et al., 1991, 1993, 2001; De Keyser, 2000; Foster, Burke, 2002; Foster, Vo, 2002; Galperin, 2002; Бондарь и др., 2003; Koustov et al., 2006; Mishin, Blaunstein, 2008; Mishin, 2013; Халипов и др., 2016, 2019; Mishin et al., 2017; Степанов и др., 2017, 2021 и другие). Несмотря на важность использования разнообразных наземных средств наблюдения для изучения и анализа свойств ПД и SAPS, а также развития аналитических моделей и численного моделирования, наибольшую ценность представляют непосредственные наблюдения (*in situ*), которые могут быть получены только во время пролета спутника через субавроральную зону во время развития ПД/SAPS. Как было отмечено выше, впервые ПД открыли благодаря спутникам Космос-184 и затем АЕ-С (Гальперин и др., 1973а, 1973б; Galperin et al., 1974; Spiro et al., 1979). Интенсивные, направленные к полюсу, электрические поля, вызывающие западный дрейф, наблюдались на OGO-6 (Maynard, 1978) в полуденной F-области вблизи разрыва Харанга на инвариантных широтах менее 60° . По имеющимся данным со спутников AUREOL-1 и AUREOL-2 и меридианной цепочки ионосферных станций локализована экваториальная граница диффузной зоны высыпания мягких электронов в вечернем и околополуденном секторах MLT (Халипов и др., 1977, Гальперин и др., 1977). В (Maynard et al., 1983) сообщалось о регистрации ПД на магнитосферных высотах вблизи $L = \sim 4$ в вечернем секторе со спутника ICEE-1. Совместные наблюдения со спутника AUREOL-3 (Benkova et al., 1985) и наземной ионосферной цепочки показали то, что узкий провал ионизации расположен к экватору от границы диффузных вторжений и от полярной стенки ГИП. В статье (Rowland, Wygant, 1998) изучались статистические данные электрического поля со спутника CRESS и доказано присутствие локализованной области усиленного электрического поля между $L = 3$ и $L = 6$ при $Kp > 3$, что связано с возникновением ПД. Также по CRRES детально исследовали особенности ПД (Burke et al., 1998; Burke et al., 2000) и волновых структур в SAPS (Mishin, Burke, 2005). Данные космического аппарата IMAGE (Goldstein et al., 2003) применялись для сравнения с результатами численного моделирования SAPS. Положение экваториальной границы инжекции энергичных ионов во внутреннюю магнитосферу по измерениям со спутника AMPTE/CCE во время регистрации ПД наземными ионозондами было проанализировано в (Бондарь и др., 2003; Khalipov et al., 2003). Наблюдаемые в области SAPS надтепловые ионы O^+ образуются внутри пограничного слоя SAPS, который характеризуется высокими скоростями сдвига, как показано по данным спутника DEMETER (Seran et al., 2008), и надтепловая популяция нагревается до нескольких эВ, то есть температур, типичных для ионов плазмосферы. (Mishin et al., 2011) использовали наблюдения плазмосферных широкополосных УНЧ-излучений на спутниках Cluster и CRRES и их связь с ПД и SAPS для численного моделирования потерь энергичных электронов во внешнем радиационном поясе вследствие взаимодействия волн и частиц.

Большое количество работ в разные годы и разными научными коллективами по изучению ПД и SAPS связано с использованием данных серии спутников DMSP. В упомянутых выше работах (Foster, Burke, 2002; Foster, Vo, 2002) данные радара некогерентного рассеяния Millstone Hill и одновременный пролет спутника DMSP через SAPS показали, что наиболее экваториальная область конвекции лежит полностью в зоне с низкой проводимостью экваториальные границы высыпаний частиц, и SAPS и глубокий провал плотности F-области лежат в пределах R2 FAC, идентифицированных по данным магнитометра DMSP. В работе (Wang et al., 2012) представлен статистический анализ временных и пространственных эффектов SAPS по данным спутников CHAMP и DMSP за двухлетний период и утверждается, что SAPS имеет большое влияние на зональный ветер в секторе 17–21 MLT. Смоделированные крупномасштабные структуры SAPS сравнивались с наблюдениями DMSP (Lin et al., 2019) и было показано их хорошее соответствие. В (He et al., 2014) произведен анализ собранной авторами огромной базы данных в 18226 случаев измерений ПД спутниками F-8–F-18 DMSP в интервале с 1987 по 2012 год и изучены сезонные и суточные вариации ПД. Авторами продемонстрировано, что имеется два пика вероятности появления ПД, а именно, весной и осенью, и два минимума — в летнее и зимнее время. Полугодовая вариация появления ПД согласуется с результатами по данным Freja, опубликованным в (Karlsson et al., 1998), и с заключениями статьи (He et al., 2012), где были использованы наблюдения спутников DE-2, Akebono, Astrid-2 и Freja и анализировались соотношения между широтным расположением ПД и геомагнитными индексами Kp, AE и Dst (Disturbance storm-time index).

Как указано выше, в работах (Puhl-Quinn et al., 2007; Mishin, Puhl-Quinn, 2007; Mishin et al., 2010; Mishin, 2013) приведены магнитно-сопряженные многоспутниковые наблюдения ПД спутниками Polar, серией спутников Cluster и DMSP вблизи магнитного экватора и в верхней ионосфере. В дальнейшем в статье (Mishin et al., 2017) делается попытка расширить понимание развития ПД и SAPS во время суббурь с помощью наблюдений с космических аппаратов CRRES, Cluster, THEMIS и Van Allen Probes (VAP) магнитно-сопряженных с DMSP. Кроме того, сопряженные наблюдения спутников DMSP F-13 и F-15 продемонстрировали, что FAC, поступающие в ионосферу из магнитосферы, лежат на внешней границе кольцевого тока (Yuan et al., 2017). По данным доплеровских измерений на Якутской меридиональной сети субавроральных ионосферных станций и DMSP исследованы вертикальные и горизонтальные дрейфы плазмы во время регистрации ПД в слое F2 ионосферы (Халипов и др., 2016), а авторы (Wang, Lühr, 2013) анализировали сезонную вариацию в оттоке ионов в верхней ионосфере в периоды возникновения SAPS, используя данные DMSP за два года. В работе (Халипов и др., 2016) наблюдения ПД на спутниках DMSP позволили статистически выявить зависимость положения его экваториальной границы от величины AE индекса. Авторы работы (Mishin et al.,

2003) показали, что существует два типа волновых явлений внутри SAPS во время магнитной бури 6 ноября 2001 года, а именно, первый и более распространенный тип характерен для электромагнитных и плазменных вариаций плотности в диапазоне частот ~ 0.15 Гц в системе отсчета спутника, а второй характеризуется большой амплитудой колебаний плазмы и поля в более широком диапазоне частот от 0.1 до 0.3 Гц.

На основе данных DMSP были найдены интересные случаи, когда на одном пролете спутника рядом наблюдались два отдельных пика скоростей ПД, то есть так называемый DSAID (Double-peak Subauroral Ion Drift, двухпиковый SAID) (He et al., 2016). Эти результаты позже были подтверждены в исследовании (Wei et al., 2019) с привлечением не только измерений DMSP, но и VAP. Объяснение механизма возникновения и развития данного явления представлено в работах (He et al., 2016, Wei et al., 2019) и (Horvath, Lovell, 2017). В (He et al., 2016) предполагается, что источником DSAID может являться магнитосферный генератор тока. Большие азимутальные градиенты ионного давления в экваториальной плоскости вызывают относительно большие FAC. Взаимодействия волна-частица могут создавать многослойные структуры FAC. Электрические поля ионосферы регулируются соответствующим образом, чтобы обеспечить ток, необходимый для магнитосферы, когда FAC втекают в ионосферу в области низкой проводимости, связанной с ГИП. Если заданных нисходящих FAC недостаточно для возврата всего ионосферного тока Педерсена в области низкой проводимости, ток может быть вынужден создать другой канал, что приведет к появлению нескольких коротко замкнутых цепей, каждая из которых генерирует большие субавроральные полярные электрические поля и последующий сильный дрейф ионов на запад. Результаты (Wei et al., 2019) подтверждают, что SAPS действительно связан с R2 FAC, протекающими в области с низкой проводимостью, а DSAID — с так называемыми двойными провалами проводимости (double-conductance-trough). Авторы статьи (Horvath, Lovell, 2017) развивают данный подход, связывая случаи появления DSAID с циклом конвекции Данжи (Dungey, 1961), а также показывая, что вышеупомянутые коротко замкнутые цепи («short-circuited») иногда действуют как генератор тока, а иногда как генератор напряжения.

Таким образом, комплексные исследования с участием разнообразных космических миссий позволили выявить основные крупномасштабные черты в формировании и развитии ПД, определить время и место, где с максимальной вероятностью появляются субавроральные ионные дрейфы, а также связь с геомагнитными возмущениями. Однако многие спутники не были оснащены необходимыми приборами для более глубокого изучения характеристик электромагнитных и плазменных возмущений, создаваемых на высотах внешней ионосферы во время пролета 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. В первой Главе данной диссертационной работы используются данные спутника NorSat-1, который проводил измерения параметров ионосферной плазмы (*in situ*) зондами Ленгмюра. Высокая частота опроса данного прибора впервые позволила проводить исследования мелкомасштабной структуры ПД в субавроральной области во время геомагнитной активности. Также, для сравнения динамики развития ПД по данным различных низкоорбитальных спутников помимо наблюдений NorSat-1 использовались наблюдения спутника Swarm C (Синевич и др., 2021a,b, 2022).

1.2 Спутниковые инструменты

1.2.1 Спутник NorSat-1

14 июля 2017 года с космодрома Байконур на солнечно-синхронную орбиту с наклонением 98° и высотой ~ 600 км был запущен первый норвежский научный микроспутник NorSat-1 (масса ~ 16 кг, размеры $23 \times 39 \times 44$ см). Основной задачей спутника является наблюдение за морским сообщением в норвежских водах с помощью Automatic Identification System (AIS). Кроме этого, на спутнике установлено два научных прибора: Compact Lightweight Absolute Radiometer (CLARA) для наблюдения за солнечным излучением и его изменениями по времени и 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. Изображение спутника и зондов Ленгмюра представлено на Рисунке 1.12.

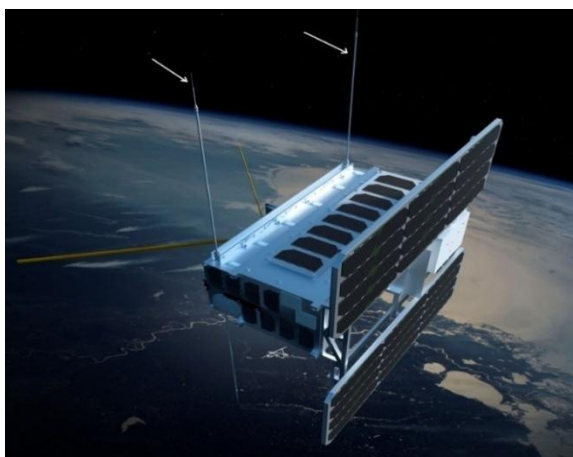


Рисунок 1.12 — Изображение спутника NorSat-1. Стрелками указано положение двух из четырех зондов Ленгмюра (Hoang et al., 2018).

Классический (например, сферический) зонд Ленгмюра производит измерения на диапазоне напряжений, строя вольтамперную характеристику, из которой вычисляются параметры плазмы (Рисунок 1.13). 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.

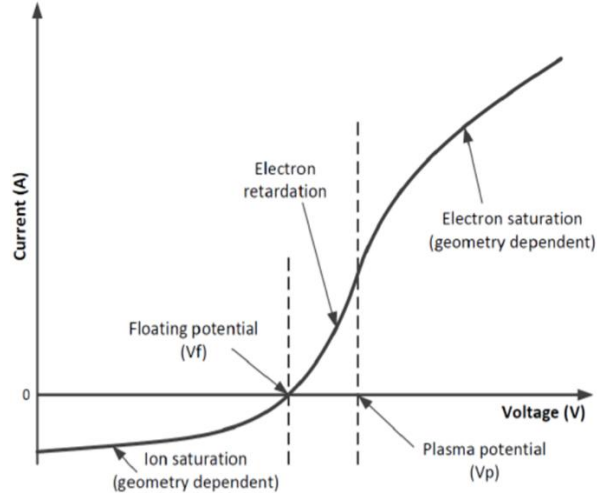


Рисунок 1.13 — Вольтамперная характеристика зонда Ленгмюра (Hoang et al., 2018).

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), см. также (Wharton, Hoegy, 1971; Hoang et al., 2018):

$$I_c = N_e A e \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{k_b T_e}{2\pi m_e}} \sqrt{1 + \frac{eV}{k_b T_e}}, \quad (24)$$

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 1.14) использует, по меньшей мере, два цилиндрических зонда, работающих при различных фиксированных напряжениях (Jacobsen et al., 2010):

$$N_e = \frac{1}{KA} \sqrt{\frac{\Delta(I_c)^2}{\Delta V_b}}, \quad (25)$$

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

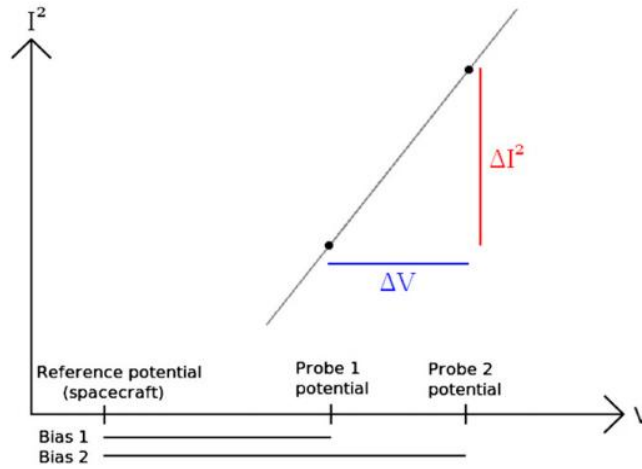


Рисунок 1.14 — Метод измерения многоигольной системы зондов Ленгмюра. Два цилиндрических зонда под фиксированными напряжениями дают две точки на графике I^2 от V (Jacobsen et al., 2010).

Ключевой особенностью m-NLP является возможность определять электронную концентрацию без необходимости знать потенциал плазмы и температуру электронов. Температуру электронов можно рассчитать при фиксированном напряжении V_p относительно потенциала космического аппарата V_s , (V_0 — потенциал плазмы):

$$I_c(V_p) = \frac{N_e A e}{4} \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{8k_b T_e}{\pi m_e}} \sqrt{1 + \frac{e((V_s + V_p) - V_0)}{k_b T_e}}, \quad (26)$$

где R — отношение квадратов токов двух зондов с разными потенциалами:

$$R = \frac{I_c^2(V_{p1})}{I_c^2(V_{p2})} = \frac{\frac{e^2 N_e^2 A^2}{16} \frac{8k_b T_e}{\pi m_e} \frac{\pi}{4} \left(1 + \frac{e((V_s + V_{p1}) - V_0)}{k_b T_e} \right)}{\frac{e^2 N_e^2 A^2}{16} \frac{8k_b T_e}{\pi m_e} \left(1 + \frac{e((V_s + V_{p2}) - V_0)}{k_b T_e} \right)} = \quad (27)$$

$$= \frac{\left(1 + \frac{e((V_s + V_{p1}) - V_0)}{k_b T_e}\right)}{\left(1 + \frac{e((V_s + V_{p2}) - V_0)}{k_b T_e}\right)}. \quad (28)$$

Используя отношение R, можно найти температуру электронов:

$$1 + \frac{e((V_s + V_{p1}) - V_0)}{k_b T_e} = R \left(1 + \frac{e((V_s + V_{p2}) - V_0)}{k_b T_e}\right), \quad (29)$$

$$k_b T_e + e((V_s + V_{p1}) - V_0) = R(k_b T_e + e((V_s + V_{p2}) - V_0)), \quad (30)$$

$$T_e = \frac{e((R - 1)(V_s - V_0)) + R V_{p2} - V_{p1}}{(1 - R)k_b}. \quad (31)$$

При $V_0 = 0$, получается уравнение для температуры электронов в электрон-вольтах:

$$\frac{k_b T_e}{e} = \frac{R(V_s + V_{p2}) - (V_s + V_{p1})}{1 - R}. \quad (32)$$

Поскольку потенциал спутника V_s неизвестен, то в области насыщения электронов вольтамперной характеристики зондов Ленгмюра точные значения температуры с помощью данной формулы рассчитать невозможно. Однако, хотя абсолютная температура электронов не может быть получена без знания потенциала спутника в соответствии с теорией зондов Ленгмюра, можно рассчитать абсолютное изменение температуры и, таким образом, изучить изменение температуры по времени и широте (Chernyshov et al., 2020b). Следовательно, температуру T_e , рассчитанную по данным спутника NorSat-1, далее в тексте не следует воспринимать в строгом смысле понятия «температура».

1.2.2 Спутниковая система Swarm

Миссия Swarm Европейского Космического Агентства, состоящая из трех спутников, была запущена 22 ноября 2013 года на околополярную круговую орбиту высотой ~460 км (Swarm A и Swarm C) и ~510 км (Swarm B) (Рисунок 1.15). Для измерения параметров ионосферной плазмы на спутниках миссии Swarm установлены по два сферических зонда Ленгмюра с частотой опроса до 16 Гц (Knudsen et al., 2017).



Рисунок 1.15 — Изображение спутниковой миссии Swarm. В верхней части рисунка изображен спутник Swarm B, в нижней части — спутники Swarm A и Swarm C.

В рассмотренные в первой Главе моменты времени спутники NorSat-1 и Swarm C пролетали достаточно близко друг от друга по времени (9–26 мин) и по MLT (01–02 часа MLT) на высотах ~460 км (Swarm C) и ~600 км (NorSat-1), что позволяет провести детальный анализ измерений ПД по данным обоих спутников.

На спутниках Swarm зонды Ленгмюра представляют собой сплошные сферы радиусом 4 мм, изготовленные из титана. Они привинчиваются к стержням длиной 8 см, которые крепятся к корпусам спутников с помощью опоры зонда. Одна из сфер зонда имеет поверхность из нитрированного титана (TiN), другая — из золота (Au), позолоченного методом электролиза. Поверхность из золота заменила один из оригинальных зондов из TiN из-за опасений, что тонкий слой окисления на поверхности TiN может повлиять на работу зондов в относительно плотной холодной ионосферной плазме. В нормальном режиме зонд Ленгмюра на спутниках Swarm переключается между двумя подрежимами: классическим режимом развертки и «гармоническим» режимом с более высокой частотой. Развертка выполняется только один раз каждые 128 с длительностью 1 с. Смещение ступенчато изменяется в диапазоне напряжений, охватывающем соответствующие участки вольтамперной характеристики. Количество шагов достигает 256, а максимальное смещение составляет ± 5 В. Диапазон развертки можно задавать вручную; обычно достаточно от -1.5 до +2.5 В. Кроме смещения V_s , вольтамперные характеристики зависят от концентрации электронов N_e и температуры T_e плазмы, окружающей зонд. Насыщение электронного тока происходит при большом положительном смещении:

$$I = I_{ph}(V_p) + \begin{cases} F_e N_e \sqrt{T_e} \exp\left(\frac{V_p}{T_e}\right) + F_i N_i \left(1 - \frac{V_p}{E_i}\right) & V_p < 0 \\ F_e N_e \sqrt{T_e} \left(1 + \frac{V_p}{T_e}\right) & V_p > 0 \end{cases}, \quad (33)$$

где I — полный ток; N_i — концентрация ионов; N_e — концентрация электронов; T_e — температура электронов; E_i — энергия ионов.

$$V_p = V_b + V_s, \quad (34)$$

где V_b — приложенное к зонду напряжение; V_s — потенциал спутника.

$$I_{ph} = -I_{ph0} \begin{cases} 1 & V_p < 0 \\ \exp\left(-\frac{V_p}{E_{ph}}\right) & V_p > 0 \end{cases}, \quad (35)$$

где E_{ph} — характерная энергия, испускаемая фотоэлектронами. Коэффициенты F_e и F_i для сферического зонда в уравнении (33):

$$F_e = 4\pi r_p^2 \sqrt{1/(2\pi m_e)}, \quad (36)$$

$$F_i = \pi r_p^2 e u_i, \quad (37)$$

u_i — скорость спутника; r_p — радиус зонда; m_e — масса электрона.

Зонд Ленгмюра на спутниках Swarm 99% времени работает в «гармоническом» режиме. Чтобы справиться с неизвестным V_s , подстраивается напряжение v_{tr} , при котором ток равен 0. v_{tr} не является V_s , но $-v_{tr}$ дает приблизительное представление о его значении. После нахождения v_{tr} напряжение циклически проходит только через три точки на вольтамперной характеристике (Рисунок 1.16):

1. Отрицательное напряжение v_{ion} , такое, что значимым является только ионный ток в уравнении (31);
2. Напряжение v_{lin} , которое находится выше «колена» вольтамперной характеристики и при котором электронный ток насыщается;
3. Напряжение v_{ret} в интервале электронного замедления на пересечении линейных экстраполяций областей ионного и электронного насыщения.

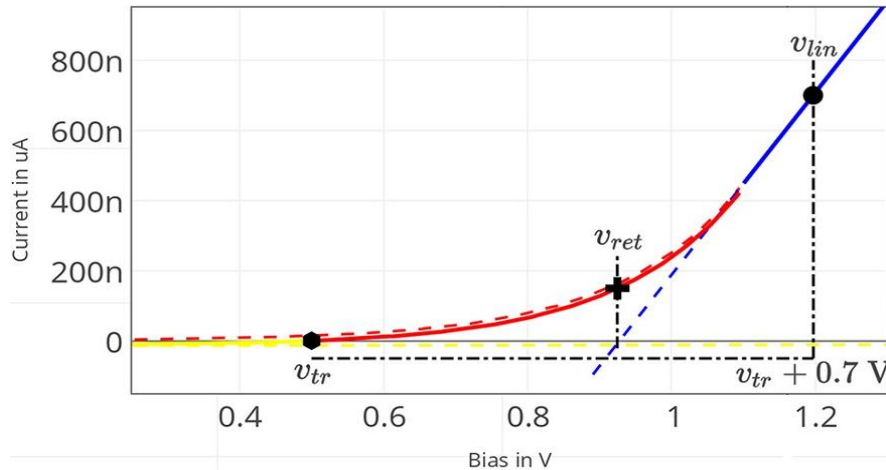


Рисунок 1.16 — Напряжения на вольтамперной характеристике зонда Ленгмюра, на которых проводятся измерения тока в «гармоническом» режиме прибора на спутнике Swarm.

Точки смещения находятся в областях ионного насыщения, электронного насыщения и электронного замедления соответственно. В каждой из трех точек напряжение модулируется синусоидально или «пульсирует» на частотах до примерно 128 Гц и с регулируемой

амплитудой. При такой гармонической модуляции получается не только ток (i), но и комплексная проводимость. Действительная часть проводимости (d) является производной вольтамперной характеристики. Предполагается, что емкость (мнимая часть) мала и может быть использована для обнаружения внешних естественных или инструментальных помех. В каждой точке «пульсация» длится порядка 100 мс, а ток и проводимость усредняются примерно за десять периодов пульсации. Таким образом, из уравнения (33) получается (Knudsen et al., 2017):

$$i_{ion} = -F_i N_e \left(1 - \frac{v_{ion} + V_s}{E_i} \right), \quad (38)$$

$$d_{ion} = \frac{F_i N_e}{E_i}, \quad (39)$$

$$i_{ret} = -F_i N_e \left(1 - \frac{v_{ret} + V_s}{E_i} \right) F_e N_e \sqrt{T_e} \exp \left(\frac{v_{ret} + V_s}{T_e} \right), \quad (40)$$

$$d_{ret} = \frac{F_i N_e}{E_i} - F_{ret} \left(\frac{N_e}{\sqrt{T_e}} \right) \exp \left(\frac{V_{ret} + V_s}{T_e} \right), \quad (41)$$

$$i_{lin} = F_e F_e \sqrt{T_e} \left(1 + \frac{v_{lin} + V_s}{T_e} \right), \quad (42)$$

$$d_{lin} = \frac{F_e N_e}{\sqrt{T_e}}. \quad (43)$$

Температура электронов может быть определена без области электронного насыщения с использованием уравнений (39)–(41):

$$T_e = \frac{(i_{ret} - i_{ion} - d_{ion}(v_{ret} - v_{ion}))}{d_{ret} - d_{ion}}. \quad (44)$$

Чтобы получить потенциал спутника нужно (40) разделить на (41):

$$V_s = \frac{i_{lin}}{d_{lin}} - v_{lin} - T_e. \quad (45)$$

Чтобы справиться с широким динамическим диапазоном плотности ионосферы, один зонд работает с высокой чувствительностью к входному току, а другой — с низкой. Относительная разница в чувствительности составляет примерно 50 раз. Высокочувствительный зонд был разработан для насыщения при плотностях выше $1 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$.

1.2.3 Спутниковая программа DMSP

Большое количество исследований, проведенных различными научными группами по изучению ПД в разные годы, связано с использованием данных Программы метеорологических спутников обороны США (Defense Meteorological Satellite Program, DMSP), которая собирает метеорологические данные в интересах министерства обороны США уже более пятидесяти лет

и предоставляют надежные данные о космической погоде. Спутники DMSP представляют собой космические аппараты на полярной орбите высотой около 835–860 км с периодом обращения 101 мин (Рисунок 1.17). Поскольку спутники NorSat-1 и Swarm не оснащены измерениями дрейфа ионов, данные измерений миссии DMSP, на борту которой установлен дрейфметр, используются в данной диссертационной работе для явного подтверждения существования ПД в рассматриваемое время в рассматриваемом месте.



Рисунок 1.17 — Изображение спутника программы DMSP.

Ионный дрейфметр в составе Высотного Ионосферного Плазменного Монитора (SSIES, Special Sensor for Ion and Electron Scintillation) предназначен для измерения горизонтальной и вертикальной составляющих движения плазмы (Greenspan et al., 1986). Скорость дрейфа считается из угла прихода частицы на коллектор:

$$V_h = (V_{sc} + V_d) \tan \alpha, \quad (46)$$

$$V_v = (V_{sc} + V_d) \tan \beta, \quad (47)$$

где V_{sc} — скорость космического аппарата;

V_d — продольная скорость движения плазмы;

α — угол прихода частицы на коллектор по горизонтали;

β — угол прихода частицы на коллектор по вертикали.

Горизонтальный угол прихода частицы определяется разницей собранных токов между левой и правой половинами коллектора, а вертикальный — между верхней и нижней половинами коллектора (Рисунок 1.18).

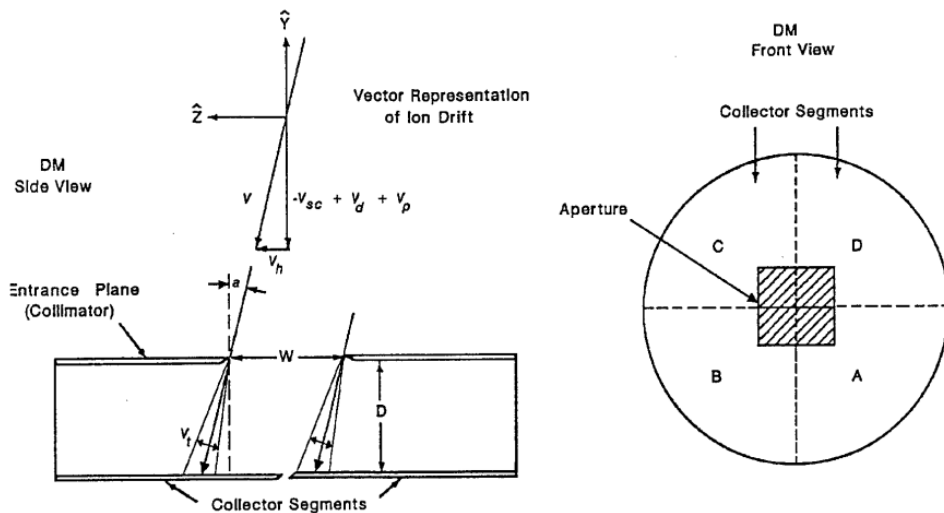


Рисунок 1.18 — Схема дрейфметра на борту DMSP (Greenspan et al., 1986).

Помимо дрейфметра, измеряющего горизонтальные и вертикальные скорости дрейфа ионов, на борту спутников DMSP установлен направленный в надир спектрографический датчик ультрафиолетового излучения (SSUSI, Special Sensor Ultraviolet Spectrographic) (Paxton et al., 1992), который измеряет ультрафиолетовое излучение на пяти различных длинах волн: 121.6, 130.4, 135.6, LBHS (Lyman-Birge-Hopfield Short) 140–150 и LBHL (Lyman-Birge-Hopfield Long) 165–180 нм. Цветные изображения с SSUSI охватывают видимый диск Земли от горизонта до горизонта и противосолнечный лимб до высоты примерно 520 км. SSUSI на борту спутников DMSP раз в час предоставляет УФ-снимки авроральных излучений с высоким разрешением ($10 \text{ км} \times 10 \text{ км}$) шириной 3000 км (Рисунок 1.19). Эти данные преобразуются в средние энергии и потоки энергии выпадающих электронов. Таким образом, используя SSUSI, можно определить границы авроральных высыпаний и тем самым четко понять, где в ионосфере проходит граница между авроральной и субавроральной зонами. Как было сказано выше, ПД обычно располагается внутри ГИП в субавроральной области и экваториальнее границы высыпаний мягких электронов, поэтому важно знать, где именно расположена эта граница для более точного определения местоположения ПД.

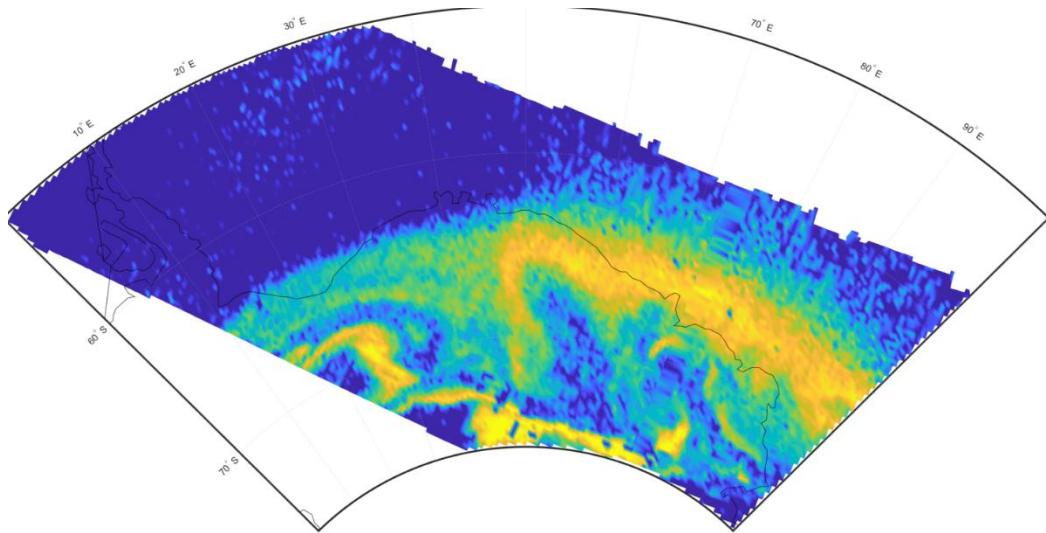


Рисунок 1.19 — Пример УФ-снимка прибора SSUSI в южном полушарии Земли, полученный со спутника DMSP F-17 в диапазоне длин волн 165–180 нм (LBHL).

1.3 Поляризационный джет 20 апреля 2018 года

В первой Главе данной диссертационной работы рассматривается ПД во время геомагнитной бури 20 апреля 2018 года по данным совместных измерений спутников NorSat-1, Swarm C, DMSP F-17 и по измерениям наземной сети радаров SuperDARN. На Рисунке 1.20 представлены геомагнитный индекс SME (SuperMAG Electrojet Index) (*a*) (Newell, Gjerloev, 2011; Gjerloev, 2012), характеризующий геофизическую обстановку в авроральных и субавроральных областях и геомагнитный индекс Dst (*б*) (Mayaud, 1980; Nose et al., 2015), характеризующий глобальную геофизическую обстановку (изменения кольцевого тока), за 20 апреля и с 19 по 21 апреля 2018 года соответственно. Этот интервал был выбран для того, чтобы на графике Dst можно было увидеть как основную фазу бури, так и фазу ее восстановления. Красными стрелками на Рисунке 1.20 указаны моменты времени рассмотренных пролетов спутников. Как следует из Рисунка 1.20а, максимальное значение SME-индекса наблюдалось приблизительно в 10 UT (Universal Time, всемирное время) и достигало более 1500 нТл. Около 10 UT 20 апреля начинается фаза восстановления геомагнитной бури, и в это же время авроральная геомагнитная активность наиболее высока. Таким образом, в 10 UT 20 апреля 2018 года вероятность обнаружить ПД — наибольшая согласно (Anderson et al., 1993; Foster, Vo, 2002).

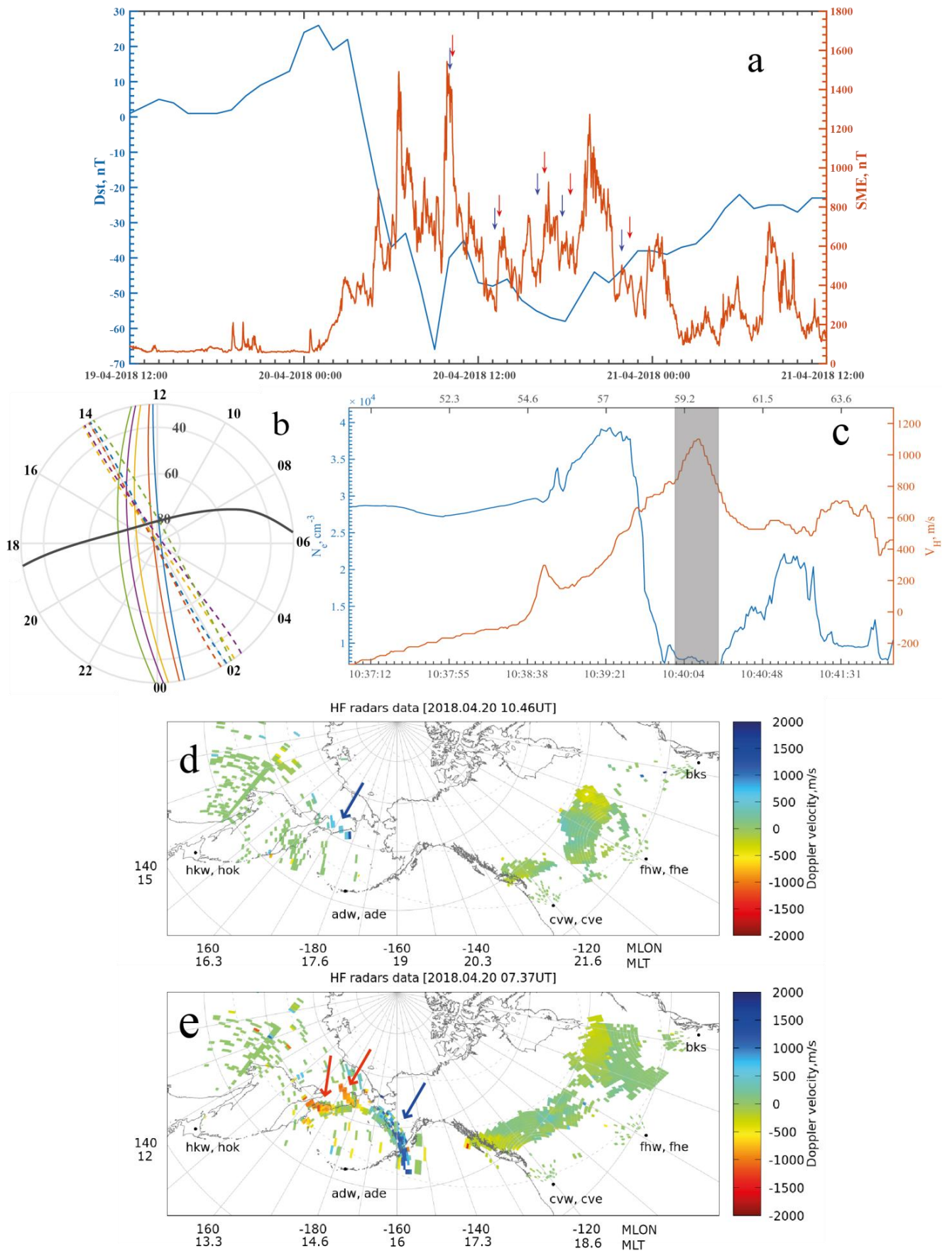


Рисунок 1.20 — (а) Геомагнитные индексы Dst (синяя линия) и SME (красная линия) с 12 UT 19 апреля 2018 года по 12 UT 21 апреля 2018 года. Стрелки указывают моменты времени, когда был обнаружен ПД в каждом из рассматриваемых пролетах NorSat-1 (красная) и Swarm C

(синяя). (b) Траектории рассматриваемых 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). (c) Эволюция скорости горизонтального дрейфа ионов (красная линия) и электронной концентрации (синяя линия) во время пролета DMSP F-17 в 10:37:00–10:42:00 UT. (d, e) Данные доплеровской скорости с радаров SuperDARN в 10:46 (d) и в 07:37 UT (e). Красные области, обозначенные красными стрелками, показывают скорости западного дрейфа, измеренные радаром ADW, синие области, обозначенные синими стрелками, показывают скорости западного дрейфа, измеренные радаром HOK (d) и ADE (e).

Географические широты обозначены сплошными контурами, геомагнитные широты — пунктирными.

На Рисунке 1.20b 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 (Karlsson et al., 1998) 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. Сравнение измерений спутников NorSat-1 и Swarm C приведено в подразделе 3.1.2.

В первой Главе настоящей диссертационной работы использованы измерения скорости дрейфа ионов *in situ* спутника DMSP F-17 и данные доплеровской скорости радаров SuperDARN ADW и ADE — Adak West и Adak East (США, географические координаты — 51.89° с. ш., 176.62° з. д.) и HOK — Hokkaido East (Япония, географические координаты — 43.53° с. ш., 143.61° в. д.), 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 1.20c. Очевидно, что 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. Стоит отметить, что скорость дрейфа ионов внутри рассматриваемого провала электронной концентрации превышает 1000 м/с, что является типичной скоростью дрейфа ПД (Anderson et al., 1991) в интервале шириной $\sim 1^\circ$ широты, характерном для ПД (Karlsson et al., 1998). Более того, расположение 18 MLT и 60° геомагнитной широты также типично для ПД (Spiro et al., 1979). Таким образом, DMSP F-17 пересек ПД в рассматриваемом интервале времени. Предполагается, что это тот же ПД, что измерен спутниками NorSat-1 и Swarm C. Разница в MLT между спутником DMSP F-17 и спутниками NorSat-1 и Swarm C в ~ 7 –8 часов может быть объяснена тем, что ПД обычно вытянут вдоль SEB и находится между 16 и 02 MLT

(Spiro et al., 1979; Karlsson et al., 1998). Разница во времени около 30 минут может быть объяснена тем, что типичная продолжительность ПД составляет от 30 минут до 3 часов согласно (Anderson et al., 1991) и до 12 часов согласно (Степанов и др., 2024). Кроме того, разница в геомагнитной широте в 7° обусловлена тем, что, согласно Рисунку 1.20а, после $\sim 10:10$ UT происходит значительное падение геомагнитной активности, а, согласно работе (Karlsson et al., 1998), средняя геомагнитная широта ПД увеличивается с уменьшением геомагнитной активности.

На Рисунках 1.20d и 1.20e представлены измерения доплеровской скорости дрейфа ионосферной плазмы, полученные радаром SuperDARN на высотах области ионосферы F2 (~ 300 км). Стрелка на Рисунке 1.20d указывает на полосу западных плазменных дрейфов шириной 1° – 2° широты с доплеровскими скоростями 500–1500 м/с, наблюдавшихся лучами НОК №7–№10 в 10:46 UT, что почти в то же время, что и ПД, обнаруженный по данным DMSP F-17. Стрелки на Рисунке 1.20e иллюстрируют полосы сильных западных плазменных дрейфов шириной 2° – 4° широты, превышающие 1200 м/с, наблюдавшихся радаром ADW и ADE 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. Следует отметить, что, поскольку радары SuperDARN измеряют проекцию скорости на направление луча, фактическая скорость плазмы может быть значительно выше, чем показано на Рисунках 1.20d и 1.20e, в зависимости от угла между направлением луча и вектором фактической скорости дрейфа плазмы (Nishitani et al., 2019). Таким образом продемонстрировано, что ПД существует во время этой геомагнитной бури. Это позволяет перейти к анализу высокочастотных измерений спутника NorSat-1 в следующем подразделе.

1.3.1 Мелкомасштабная структура по данным NorSat-1

В данном подразделе рассмотрены подробнее высокочастотные измерения спутника NorSat-1 во время одного из пролетов, отмеченных на Рисунке 1.20а–b, а именно во время первого рассмотренного пролета в 10 UT 20 апреля 2018 года. На верхней панели Рисунка 1.21 приведены измеренные m-NLP на борту спутника NorSat-1 значения электронной температуры и концентрации при движении из северной полярной шапки в сторону экватора в геомагнитных координатах. Как известно из научной литературы, например, (Galperin, 2002), ПД обычно находится внутри ГИП и часто располагается на его полярной стенке, на SEB. На Рисунке 1.21 видно, что в 10:11:25 происходит быстрое уменьшение концентрации электронов, а затем вплоть до 10:12:04 идет постепенное восстановление плотности плазмы. С большой уверенностью можно утверждать, что спутник в это время пересекал ГИП, минимум которого

приходится примерно на $\sim 53^\circ$ геомагнитной широты. Полярнее ГИП концентрация электронов увеличена по сравнению с фоновыми значениями в ~ 2 раза, что вызвано высыпаниями заряженных частиц из магнитосферы. Таким образом, ПД располагается на полярной стенке этого ГИП. Действительно, если посмотреть на значения электронной температуры, то заметно, что в области полярнее ГИП температура повышена, что является следствием высыпаний электронов, однако и на полярной границе ГИП виден локальный провал концентрации электронов, который сопровождается увеличением электронной температуры в ~ 1.5 раза. Этот момент времени показан красной стрелкой (верхняя панель).

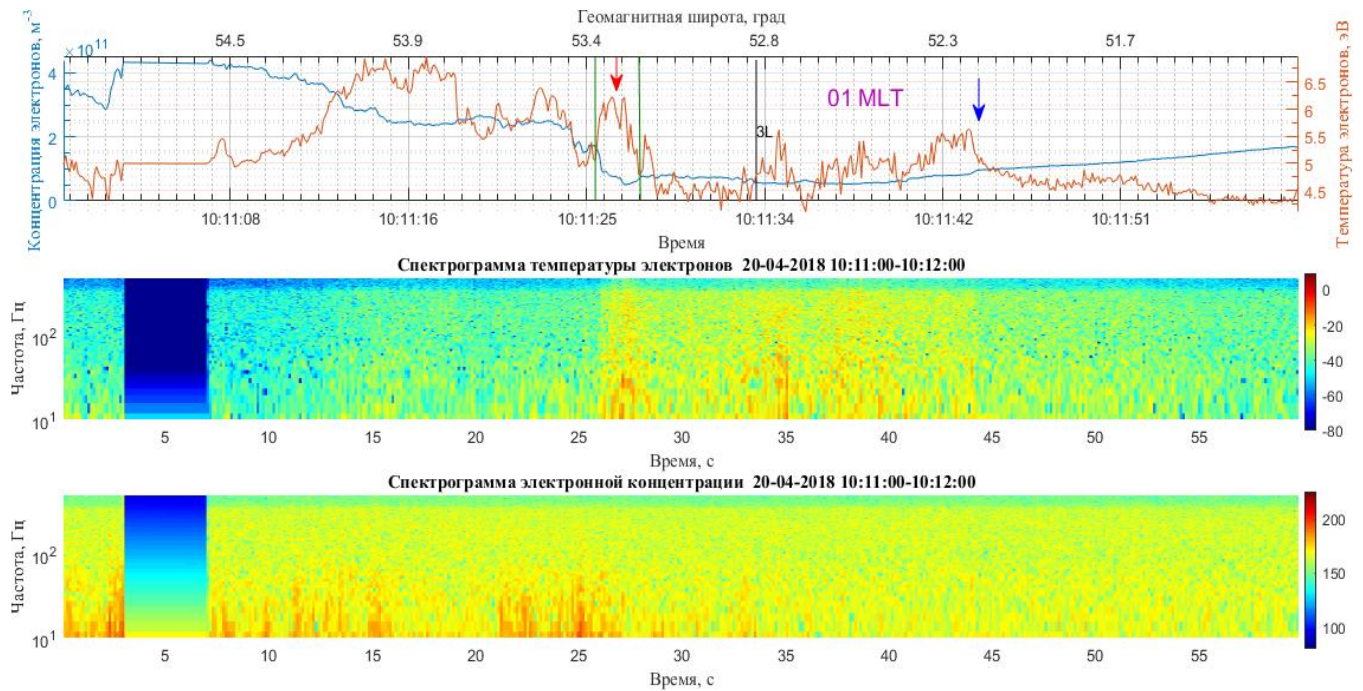


Рисунок 1.21 — Значения концентрации (синяя линия) и температуры (красная линия) электронов и их спектрограммы, измеренные NorSat-1 во время пролета в 10 UT 20 апреля 2018 года. Красная стрелка и зеленые вертикальные линии — наиболее глубокая часть у полярной стенки субаврорального провала электронной концентрации. Синей стрелкой отмечена экваториальная граница провала электронной концентрации.

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). Поскольку размер данной области по широте составляет 1.1° , что является типичным размером ПД (1° – 2°), целесообразно предположить, что вся эта область является ПД. В таком случае, 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, например Фарли-Бунемана (Farley, 1963). Для их обнаружения на средней и нижней панели Рисунка 1.21 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 спектрограммам можно сделать вывод о наличии мелкомасштабных неоднородностей температуры внутри ПД с пространственными размерами до сотен метров.

1.3.2 Сравнение с измерениями Swarm

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 сегодняшний момент существует большое количество исследований выполненных с использованием данных измерений спутников серии Swarm, например (Archer et al., 2019; Jin et al, 2020; Wan et al., 2020 и др.).

На Рисунке 1.22a–b представлено сравнение изменений концентрации и температуры электронов по наблюдениям спутников NorSat-1 (Рисунок 1.22a) и Swarm C (Рисунок 1.22b) во время совместного пролета. Оба спутника в момент этого пролета находились в северном полушарии и летели от полюса к экватору в секторах ~ 01 и ~ 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 ~ 6 минут. На Рисунке 1.22a внутри ПД за счет высокой частоты опроса m-NLP на борту спутника NorSat-1 видны мелкомасштабные флуктуации электронной температуры. Также заметны упомянутые в предыдущем разделе и отмеченные стрелками четыре локальных провала концентрации размером в 0.21° широты, совпадающих с подъемом температуры, которые вероятно могут быть стратами, из которых состоит ПД.

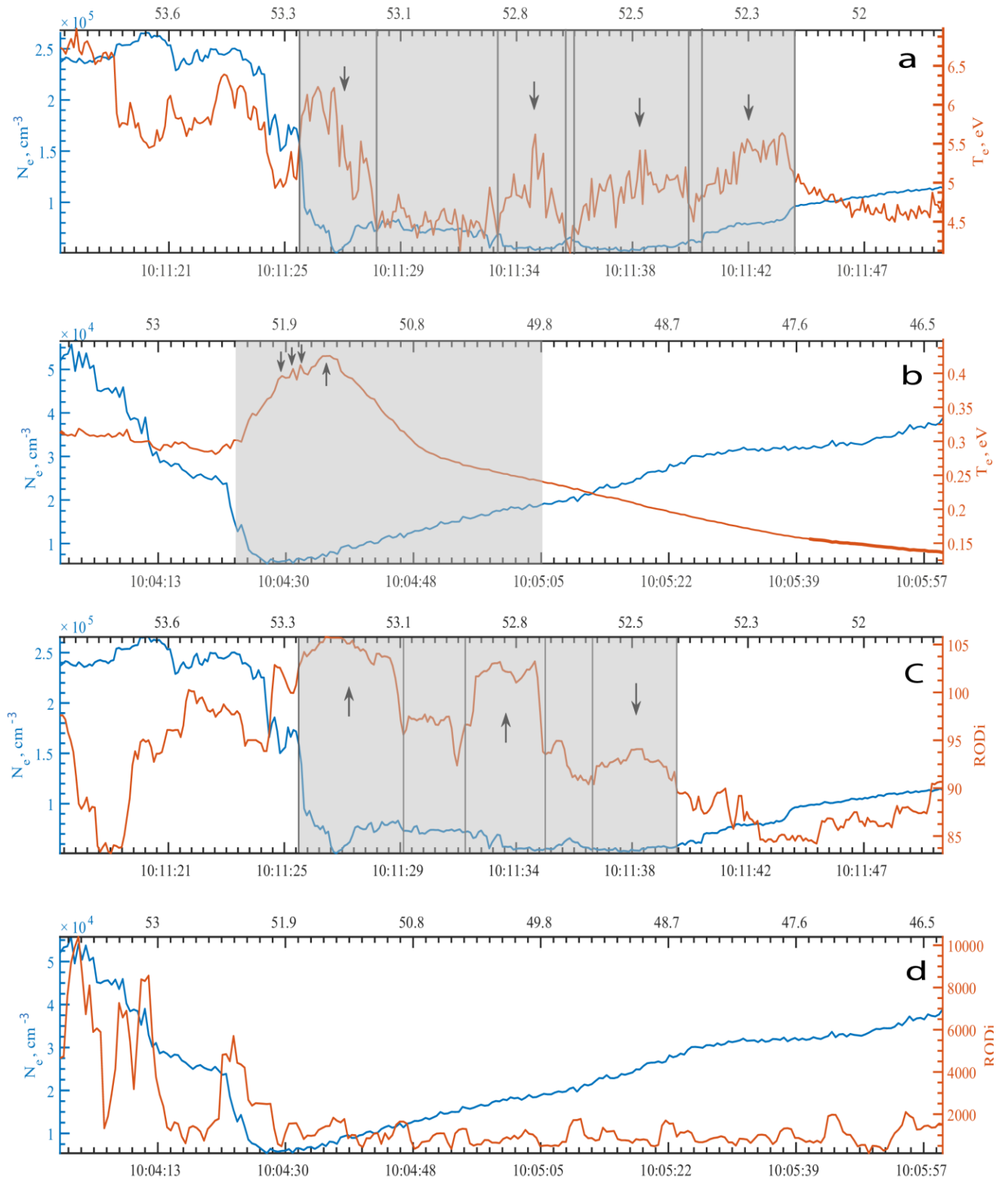


Рисунок 1.22 — Изменение температуры и электронной концентрации во время пролета NorSat-1 в 10:11:18–10:11:51 UT 20 апреля 2018 года (a) и пролета Swarm C (b) в 10:03:48–10:04:58 UT. Левая вертикальная ось — электронная концентрация, правая вертикальная ось — электронная температура. Верхняя горизонтальная ось — геомагнитная широта, нижняя горизонтальная ось — время UT. Эволюция индекса скорости изменения концентрации (RODI) и электронной концентрации во время пролета NorSat-1 (c) и пролета Swarm C (d). RODI

рассчитывается в скользящем окне 0.1 с для NorSat-1 и в скользящем окне 2 с для Swarm C. Серые области выделяют положение ПД. Стрелки указывают на небольшие пики температуры (a, b) и RODI (c), которые можно интерпретировать как страты ПД.

По данным Swarm C на Рисунке 1.22b видно, что внутри ПД на $\sim 51.8^\circ$ геомагнитной широты в 10:04:32 UT присутствуют два небольших пика температуры размерами $\sim 0.1^\circ$ широты, а также небольшой подъем температуры размером $\sim 0.2^\circ$ широты на $\sim 51.6^\circ$ геомагнитной широты в 10:04:35 UT. Данные пики и 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. Следовательно, можно предположить, что эти два эффекта могут являться одним и тем же явлением, измеренным с разной частотой опроса. 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). При этом известно, что ПД растянут вдоль широты как минимум на 8 часов MLT (Spiro et al., 1979).

Из Рисунков 1.22a и 1.22b также можно сделать вывод, что положение ПД во время пролета NorSat-1 ($\sim 53.3^\circ$ – 52.2° геомагнитной широты) отличается от положения ПД во время пролета Swarm C ($\sim 52.4^\circ$ – 50.8° геомагнитной широты) примерно на 1.2° геомагнитной широты. Учитывая, что разница в MLT между спутниками NorSat-1 и Swarm C составляет 2 часа, разницу в геомагнитной широте ПД можно объяснить тем, что, согласно таблице 1 из работы (Karlsson et al., 1998), средняя геомагнитная широта ПД линейно уменьшается с увеличением MLT в сторону утреннего сектора со скоростью $\sim 0.55^\circ$ в час. В рассматриваемом в текущем исследовании случае эта скорость составляет $\sim 0.6^\circ$ в час. (Foster, Vo, 2002) утверждают, что средняя широта SAPS (который находится на тех же широтах, что и ПД) линейно уменьшается со скоростью ~ 0.7 MLT в час. Это также объясняет, почему западный поток ПД на Рисунке 1.20e простирается от $\sim 50^\circ$ геомагнитной широты по данным радаров HOK и ADE до $\sim 60^\circ$ геомагнитной широты по данным ADW.

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 (Jin et al., 2020) и представляющий собой стандартное отклонение скорости изменения плотности (Rate of Change of Density, ROD) в скользящем окне:

$$RODI(t) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{t_i=t-\frac{\Delta t}{2}}^{t_i=t+\frac{\Delta t}{2}} |ROD(t_i) - \overline{ROD}|^2}, \quad (48)$$

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

$$\overline{ROD} = \frac{1}{N} \sum_{t_i=t-\frac{\Delta t}{2}}^{t_i=t+\frac{\Delta t}{2}} ROD(t_i). \quad (49)$$

ROD определяется как производная по времени от электронной концентрации:

$$ROD(t) = \frac{N_e(t + \Delta t) - N_e(t)}{\Delta t}. \quad (50)$$

Таким образом, ROD относится к временным вариациям концентрации, которые могут быть соотнесены с наименьшими пространственными масштабами, измеренными спутником. Рисунки 1.22с и 1.22d иллюстрируют сравнение эволюции электронной концентрации и RODI за 0.1 с для NorSat-1 и за 2 с для Swarm C. Этот Рисунок показывает, что параметр RODI внутри ПД ведет себя аналогично электронной температуре на Рисунках 1.22а и 1.22b. 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 1.22а. 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 (Рисунок 1.22d), а увеличение RODI наблюдается только на полярной стенке ПД примерно на 52.4° геомагнитной широты, совпадающее с резким падением электронной концентрации.

Помимо сравнения данных измерений спутников NorSat-1 и Swarm было произведено также сравнение Фурье-спектров измеренной электронной концентрации. На Рисунке 1.23а–е изображены спектры электронной концентрации по данным спутников NorSat-1 и Swarm C внутри ПД во время пяти рассмотренных в данной работе совместных пролетов, в 10, 13, 16, 18 и 21 час UT 20 апреля 2018 года и представленные как функции пространственного волнового числа. На Рисунке 1.23f, для сравнения со спектрами ПД, представлен пролет спутников в 10 UT 19 апреля 2018 года, когда геомагнитная активность, согласно индексам SME (~ 80 нТл) и Dst (~ 7 нТл), была низкой (далее в тексте — «спокойный» пролет). Поскольку максимальная частота опроса прибора на спутнике NorSat-1 составляет 1 кГц, а прибора на спутнике Swarm C

— 2 Гц, спектры на Рисунке 1.23 отстают друг от друга по оси абсцисс и спектр NorSat-1 является более широким.

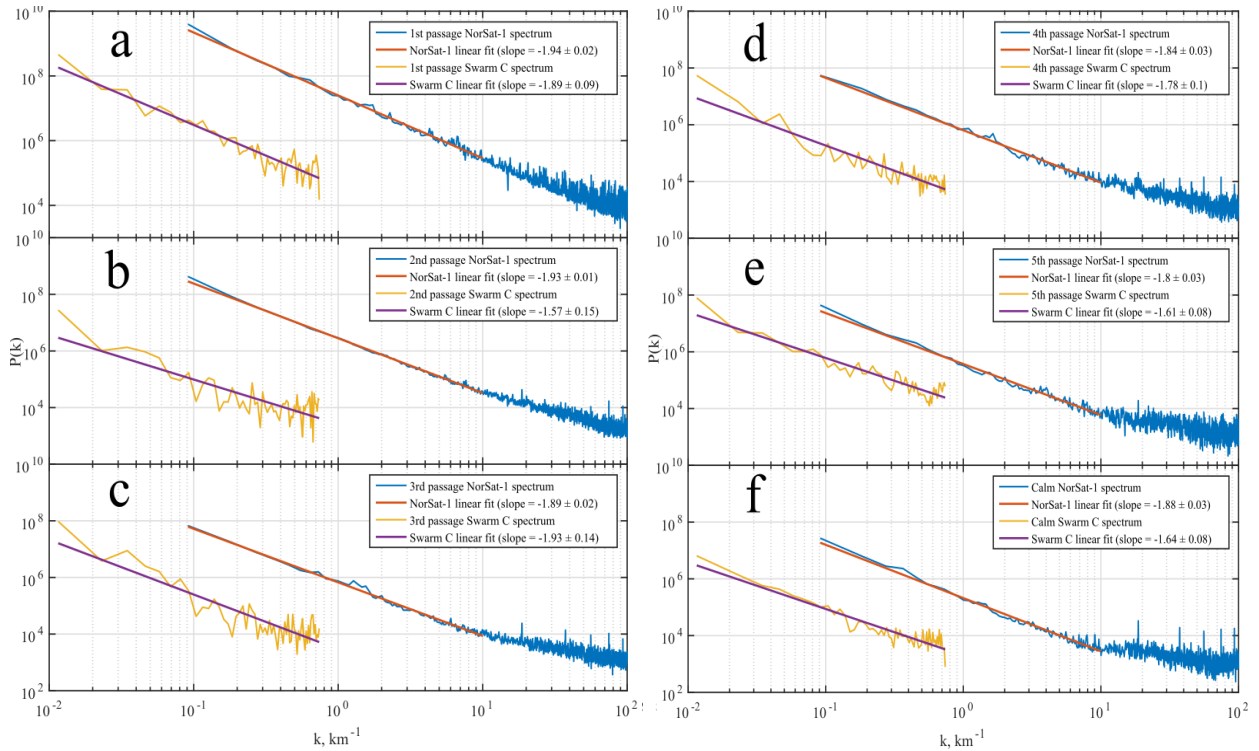


Рисунок 1.23 — Спектры электронной концентрации внутри ПД за пять рассмотренных совместных пролетов (в 10, 13, 16, 18 и 21 UT 20 апреля 2018 года), а также при пролете в «геомагнитно спокойный» день 19 апреля 2018 года спутников NorSat-1 (синяя линия) и Swarm C (желтая линия) в зависимости от пространственного волнового числа k . Прямая красная линия отмечает линейную аппроксимацию спектра NorSat-1 до $k = 10 \text{ км}^{-1}$. Фиолетовая прямая линия обозначает линейную аппроксимацию спектра Swarm C.

На Рисунке 1.23а изображены спектры электронной концентрации по данным спутников NorSat-1 и Swarm C внутри ПД во время первого рассмотренного совместного пролета спутника NorSat-1 в 10:11:25–10:11:30 UT и спутника Swarm C в 10:04:25–10:04:45 UT 20 апреля 2018 года. Как видно из Рисунка 1.23а, наклон спектра NorSat-1 до $k = 10 \text{ км}^{-1}$ во время пролета №1 составляет -1.94 ± 0.02 , в то время как наклон спектра Swarm C составляет -1.89 ± 0.09 . Таким образом, можно утверждать, что внутри ПД во время первого пролета наклоны спектров электронной концентрации, измеренные на спутниках NorSat-1 и Swarm C, практически совпадают. Во время пролета №1 (Рисунок 1.23), в момент наибольшей геомагнитной активности ($\text{SME} = \sim 1500 \text{ нТл}$) наблюдается наибольший наклон спектра (-1.94 ± 0.02) NorSat-1 до $k = 10 \text{ км}^{-1}$. Также во время пролета №1 наблюдается наибольшее значение спектральной мощности спектров NorSat-1 и Swarm C среди рассмотренных в данной работе пролетов. На $k = 10^{-1} \text{ км}^{-1}$ спектральная мощность спектра NorSat-1 составляет 5.4×10^{10} , на $k = 10 \text{ км}^{-1}$ — 2.8×10^5 . Спектральная мощность Swarm C на $k = 10^{-2} \text{ км}^{-1}$ составляет 2.25×10^9 , на k

$= 0.7 \text{ км}^{-1} \text{ — } 1.48 \times 10^4$. Также во время пролетов №2–№5 и во время «спокойного» пролета замечен излом спектра на $k = \sim 10 \text{ км}^{-1}$, в то время как на Рисунке 1.23а видно, что во время пролета №1 излом отсутствует и спектр представляет собой практически прямую линию.

На Рисунке 1.23b представлены спектры электронной концентрации внутри ПД по данным спутников NorSat-1 и Swarm C во время второго рассмотренного совместного пролета спутника NorSat-1 в 13:22:56–13:23:21 UT и спутника Swarm C в 13:08:15–13:08:45 UT 20 апреля 2018 года. На данном рисунке видно, что наклон спектра NorSat-1 до $k = 10 \text{ км}^{-1}$ составляет -1.9 ± 0.01 . Наклон спектра Swarm C во время этого пролета является наименьшим среди всех рассмотренных пролетов и равен -1.57 ± 0.15 , что может объясняться тем, что, согласно Рисунку 1.19а, в момент пересечения ПД спутником Swarm C во время пролета №2, интенсивность геомагнитной активности бури была наименьшей ($SME = \sim 250 \text{ нТл}$).

Спектры электронной концентрации внутри ПД во время третьего рассмотренного совместного пролета спутника NorSat-1 в 16:36:46–16:37:16 UT и спутника Swarm C в 16:14:30–16:14:50 UT 20 апреля 2018 года представлены на Рисунке 1.23с. Наклон спектра NorSat-1 до $k = 10 \text{ км}^{-1}$ со времени предыдущих пролетов уменьшился до -1.77 ± 0.02 , наклон спектра Swarm C во время пролета №3 составил -1.93 ± 0.14 . На участке $k > 10 \text{ км}^{-1}$ и $P \leq 10^2$ наблюдается заметный излом спектра NorSat-1, что объясняется наличием высокочастотных шумов с мощностью $\sim 10^4$.

На Рисунке 1.23d показаны спектры электронной концентрации внутри ПД во время четвертого совместного пролета спутника NorSat-1 в 18:13:58–18:14:20 UT и спутника Swarm C в 17:48:16–17:48:36 UT 20 апреля 2018 года. Наклон спектра NorSat-1 на участке $k < 10 \text{ км}^{-1}$ не изменился с предыдущего пролета и составляет -1.76 ± 0.03 . Наклон спектра Swarm C с предыдущего пролета уменьшился на 0.15 до -1.78 ± 0.1 .

Спектры электронной концентрации внутри ПД во время пятого рассмотренного совместного пролета спутника NorSat-1 в 21:27:17–21:27:30 UT и спутника Swarm C в 20:55:38–20:56:15 UT 20 апреля 2018 года представлены на Рисунке 1.23е. Наклон спектра NorSat-1 на участке $k < 10 \text{ км}^{-1}$ с предыдущего пролета уменьшился на 0.04 до -1.72 ± 0.03 . Наклон спектра Swarm C составляет -1.61 ± 0.08 . Также, на Рисунке 1.23е в спектре NorSat-1, кроме излома на $k > 10 \text{ км}^{-1}$, на участке $2 < k \leq 10 \text{ км}^{-1}$ видны несколько узких линий повышенной мощности относительно линейной аппроксимации. Вероятно, данные линии вызваны высокочастотными помехами приборов спутника.

Согласно Рисункам 1.23 и 1.20а, с уменьшением геомагнитной активности бури и увеличением номера пролета наклон спектра NorSat-1 непрерывно снижается. Наклон спектра Swarm C при этом снизился во время пролета №2 до -1.57 ± 0.15 , затем повысился до -1.93 ± 0.14 во время пролета №3, и далее в следующих пролетах продолжил уменьшаться. Кроме того,

по Рисунку 1.23 видно, что с увеличением номера пролета снижается спектральная мощность спектров, что, при приближении к значению $\sim 10^4$, вызывает появление излома спектра NorSat-1 на $k = \sim 10 \text{ км}^{-1}$.

На Рисунке 1.23f для сравнения с Рисунками 1.23а–е представлены спектры электронной концентрации по данным спутников NorSat-1 и Swarm во время совместного пролета спутника NorSat-1 в 10:26:20–10:26:40 UT и спутника Swarm C в 10:21:20–10:21:30 UT в «геомагнитно спокойный» день 19 апреля 2018 года. Как видно на Рисунке 1.23f, наклон спектра NorSat-1 во время «спокойного» пролета равен -1.75 ± 0.05 , что значительно меньше, чем во время всех рассмотренных пролетов 20 апреля 2018 года, кроме пролета №5, значение наклона спектра NorSat-1 в котором на 0.03 меньше, чем во время «спокойного» пролета, и составляет -1.72 ± 0.03 . Для удобства читателя модули наклона всех 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

1.4 Обсуждение

В первой Главе диссертационной работы представлено первое исследование мелкомасштабной структуры поляризационного джета (ПД) в субавроральной области во время геомагнитной активности с помощью низкоорбитальных спутников NorSat-1 и Swarm C. Результаты наблюдений параметров плазмы внутри ПД были получены с использованием системы зондов Ленгмюра, имеющей номинальную частоту дискретизации до 1 кГц, что впервые позволило проводить измерения с таким высоким временным разрешением. По наблюдениям на NorSat-1 и Swarm C получены спектры электронной концентрации и проанализирована их динамика во время геомагнитной бури 20 апреля 2018 года. Сравнительный анализ изменений электронной концентрации и температуры по данным NorSat-1 и Swarm C при пересечении ими ПД показал схожее поведение параметров плазмы, зарегистрированных на обоих спутниках.

В настоящем исследовании показано, что с уменьшением геомагнитной активности наклон спектра электронной концентрации внутри ПД уменьшается. Другими словами, по мере

развития геомагнитной активности возрастает роль крупномасштабных эффектов в ПД. Следует отметить, что согласно Рисунку 1.23 с развитием геомагнитной активности происходит увеличение флуктуаций плотности плазмы на всех масштабах. Показано, что мелкомасштабные неоднородности внутри ПД измеряются *in situ* и их минимальные размеры достигают сотен метров. Интенсивность мелкомасштабных неоднородностей также увеличивается с ростом геомагнитной активности, поскольку во время первого пролета, в момент которого наблюдалась максимальная геомагнитная активность ($SME = \sim 1500$ нТл), интенсивность спектра во всем диапазоне k была выше, чем во время других пролетов.

Ранее в статье (Mishin, Blaunstein, 2008) спектры плазменных неоднородностей внутри SAPS изучались по данным спутников DMSP F-13 и F-14, и было обнаружено, что они хорошо описываются степенным законом со спектральным индексом в диапазоне $-5/3 \geq p_n \geq -2$. В представленном исследовании установлено, что наклоны спектров по данным NorSat-1 находятся в диапазоне $-1.8 \geq p_n \geq -1.94$, а наклоны спектров — в интервале $-1.51 \geq p_n \geq -1.93$ в соответствии с данными Swarm C. Видно, что значения наклонов спектров в наблюдаемых случаях близки к значениям спектральных индексов в (Mishin, Blaunstein, 2008). В (Foster, Rich, 1998) была представлена спектральная мощность плотности плазмы как функция пространственного волнового числа из наблюдений DMSP F-10, а наклон составлял приблизительно -1.5 для неоднородностей с масштабами от 0.6 до 60 км. Авторы утверждают, что эти спектральные характеристики соответствуют неоднородностям, связанным с развитием F-рассеяния, и указывают на влияние геомагнитных бурь/суббурь на возникновение сцинтилляций в средних широтах (Foster, Rich, 1998). Механизм генерации плазменных неоднородностей такого типа в субавроральной области до сих пор остается открытым. Как было сказано выше, поскольку ПД может сопровождаться сверхзвуковым меридиональным дрейфом, следует ожидать образования в нем мелкомасштабных плазменных неоднородностей, вызванных различными неустойчивостями. Помимо неустойчивости Фарли-Бунемана (Farley, 1963) развитие градиентной дрейфовой неустойчивости (Kadomtsev, 1965), неустойчивости ионного фрикционного нагрева (Keskinen et al., 2004) и неустойчивости ионосферной обратной связи (Watanabe, 2010) в этой области, также могут быть ответственны за появление плазменных неоднородностей (Mishin, Blaunstein, 2008).

Кроме того, для случая 20 апреля 2018 года в данном исследовании определена скорость снижения широты ПД по мере движения в сторону увеличения MLT (в сторону рассвета) и она составляет $\sim 0.6^\circ$ за час MLT, что приблизительно соответствует ранее полученным значениям этой скорости в других работах: $\sim 0.55^\circ$ (Karlsson et al., 1998) и $\sim 0.7^\circ$ (Foster, Vo, 2002).

1.5 Выводы

В первой Главе диссертации получены следующие основные результаты:

- Обнаружены неоднородности температуры и концентрации электронов с пространственными размерами от нескольких километров до сотен метров;
- Продемонстрировано, что пространственные структуры внутри ПД не являются локальными и растянуты по MLT как минимум на 2 часа;
- Обнаружено, что иногда с развитием геомагнитной активности распределение температуры электронов внутри ПД разделяется на два пика;
- Подтверждена зависимость инвариантной широты ПД от авроральной геомагнитной активности и от местного магнитного времени;
- Показано, что по мере развития геомагнитной активности флуктуации параметров плазмы внутри ПД увеличиваются на всех масштабах, при этом возрастает роль крупномасштабных эффектов.

Глава 2. Стратифицированный поляризационный джет

2.1 Введение к Главе 2

Как было сказано ранее, изучению ПД посвящено множество научных работ, в которых были исследованы различные крупномасштабные параметры и свойства ПД. Помимо изучения крупномасштабных свойств ПД, важно также изучение мелкомасштабной структуры ПД. Это имеет большое значение, в том числе для практического применения: неоднородная внутренняя структура ПД может вызывать искажение проходящих через него радиосигналов и, тем самым создавать помехи в системе спутниковой навигации. Влияние внутренней структуры ПД на прохождение радиосигналов рассмотрено в третьей Главе данной работы.

В работе (Erickson et al., 2002) с использованием измерений радара Millstone Hill и спутников DMSP обнаружена высокая структурированность электрического поля в масштабе десятков километров на экваториальной границе ПД, что приводит к образованию неоднородностей Фарли-Бунемана. Связь между появлением ПД внутри SAPS и мелкомасштабными структурами электрического поля в SAPS рассматривается в работе (Makarevich, Bristow, 2014). Поскольку ПД имеет относительно небольшие размеры (1–2° широты), а его мелкомасштабная структура требует измерений с высоким пространственным разрешением, большое количество научных работ посвящено изучению мелкомасштабной структуры SAPS, ширина которой составляет от 3° до 5° широты (Foster, Vo, 2002). В целом, подразумевается, что направленные к полюсу электрические поля, влияющие на возникновение ПД и SAPS, развиваются благодаря одним и тем же (или похожим) механизмам. Однако (Mishin, 2013) и (Mishin et al., 2017) различают их: SAPS связан, в первую очередь, с потоками на вечерней стороне, в то время как ПД — с предполуночными потоками. SAPS и инъекции кольцевого тока в десятки кэВ на вечерней стороне появляются после начала суббури значительно быстрее, чем время градиентного дрейфа ионов в плазмосфере. Более того, околополуночные каналы ПД часто наблюдаются через несколько минут после начала суббури. Временная задержка имеет порядок времени распространения струй горячей плазмы, инжестированных при пересоединении, в предполуночную плазмосферу и суббуревой токовый клин до сумерек. Их наблюдения указали на связь инъекций SAPS и кольцевых токов на вечерней стороне с двойным контуром суббуревой токового клина (Mishin, 2013; Mishin et al., 2017). SAPS может влиять на процессы на более низких широтах, такие как экваториальный электроджет и термосферный нейтральный ветер (Wang et al., 2018; Zhang, Wang, Wang, 2022; Zhang, Wang, Yamazaki, 2022). В статье (Mishin et al., 2003) представлено исследование мелкомасштабной структуры волновых структур SAPS (SAPS Wave Structures, SAPSWS) с

использованием спутника DMSP F-15. Установлено, что квазиэлектростатические и электромагнитные волновые структуры могут сосуществовать в физической близости, и что они часто имеют узкий частотный спектр. В работе (Mishin, Burke, 2005) исследуются SAPSWS с использованием данных спутников CRRES и DMSP, а также предлагается сценарий формирования повышенных электронных температур и надтепловых потоков на экваториальной стороне SAPS. Неоднородности электронной концентрации внутри SAPS по данным спутников DMSP F-13 и F-14 исследованы в уже упомянутой в первой Главе работе (Mishin, Blaunstein, 2008). Данные зонда Ленгмюра с частотой опроса 24 Гц показывают, что спектры мощности неоднородностей плотности плазмы лежат в диапазоне $8 \geq k \geq 1 \text{ км}^{-1}$ и хорошо описываются степенным законом $(\delta n_k/n_0)^2 \sim k^{-p_n}$ со спектральным индексом $5/3 \leq p_n \leq 2$. В первой части диссертационной работы обнаружены неоднородности электронной концентрации, связанные с ПД, с тем же спектральным индексом. Стоит отметить, что индекс $k^{-5/3}$ — это спектр Колмогорова, который можно наблюдать не только для гидродинамики, но и для МГД-турбулентности (Kolmogorov, 1941; Chernyshov et al., 2014).

Различные исследования с использованием наземных средств и различных космических миссий позволили выявить основные крупномасштабные особенности формирования и развития ПД, а также выяснить условия возникновения ПД. Однако научное оборудование спутников не позволяло проводить измерения с высоким временным разрешением и, таким образом, изучать мелкомасштабные процессы и внутреннюю структуру этого явления. Во второй Главе диссертационной работы автор продолжает начатое в первой Главе исследование внутренней мелкомасштабной структуры ПД с помощью высокочастотных данных спутника NorSat-1. Однако, в отличие от первой Главы, в которой исследование ПД проводилось в рамках одного геомагнитного события 20 апреля 2018 года, во второй Главе используется более широкий набор событий, а также новые методы анализа данных, такие как $\Delta N/N$, $\Delta T/T$ и вейвлет-анализ (Sinevich et al., 2023; Синевич и др., 2023, 2024).

2.2 Методы анализа мелкомасштабных свойств

2.2.1 Метод $\Delta N/N$

Для исследования мелкомасштабных неоднородностей параметров плазмы, помимо эволюции электронной концентрации и температуры, в данной работе используются также такие параметры, как $\Delta N/N$ и $\Delta T/T$:

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{N - SMA(N)}{SMA(N)}, \quad (51)$$

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{T - SMA(T)}{SMA(T)}, \quad (52)$$

где SMA — простое скользящее среднее. Похожий параметр был использован в (Mishin, Blaunstein, 2008) для исследования неоднородностей концентрации электронов внутри SAPS.

Параметр $\Delta N/N$ показывает отклонение N от среднего значения на разных масштабах. 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° широты до 1° с шагом 0.01° . Этот подход применим и к параметру $\Delta T/T$ с той разницей, что $\Delta T/T$ показывает отклонение электронной температуры. 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 (Рисунок 2.1).

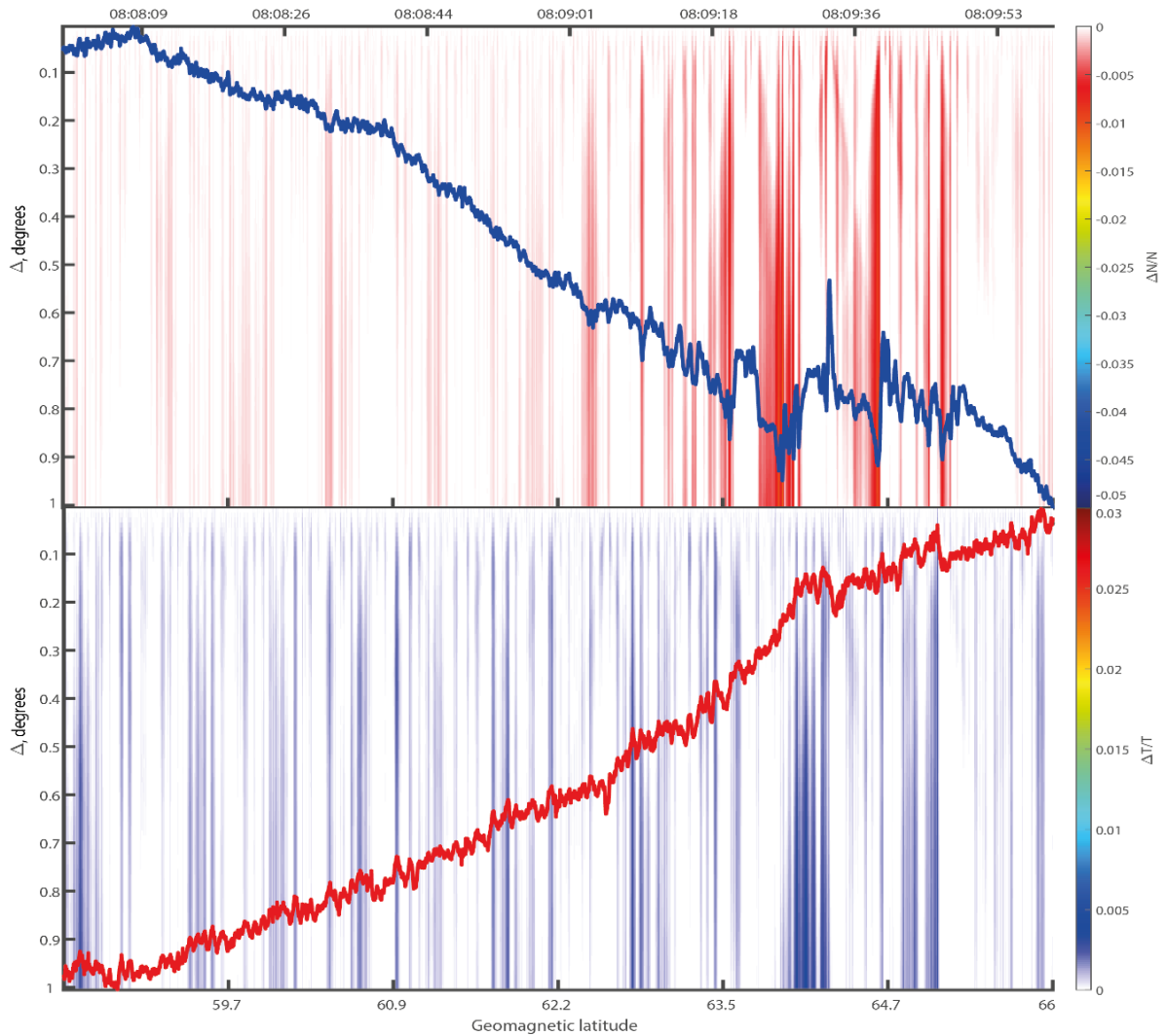


Рисунок 2.1 — Параметры $\Delta N/N$ (цвет на верхнем графике), $\Delta T/T$ (цвет на нижнем графике), электронная концентрация (синяя линия) и температура (красная линия) по данным NorSat-1 в «геомагнитно спокойный день» ($Dst = \sim 3$ нТл) 19 апреля 2018 года.

Несмотря на высокую частоту дискретизации прибора m-NLP, в данных присутствуют технические шумы, поскольку спутник NorSat-1 изначально не предназначен для научных целей. Поэтому данные усредняются по 500-точечному SMA-окну для устранения высокочастотного шума параметров $\Delta N/N$ и $\Delta T/T$. Кроме того, для исключения низкоинтенсивных шумов параметры $\Delta N/N$ и $\Delta T/T$ построены для «геомагнитно-спокойного» дня 19 апреля 2018 года (Рисунок 2.1), в течение которого геомагнитная активность была низкая ($Dst = \sim 3$ нТл) и для которого построен спектр электронной концентрации в первой Главе диссертационной работы (Таблица 1, «спокойный» пролет). Красная и синяя линии на рисунке обозначают электронную температуру и концентрацию соответственно. Известно, что в ПД температура электронов увеличивается, а концентрация электронов уменьшается (Anderson et al., 1991), поэтому значения цветовых шкал имеют разные знаки: отрицательные значения для $\Delta N/N$ и положительные для $\Delta T/T$. Далее, при установке границ цветовой шкалы (верхней для $\Delta T/T$, нижней для $\Delta N/N$), в данной работе определены такие граничные значения, при которых шум становится заметным. Эти граничные значения составляют -0.05 для $\Delta N/N$, 0.03 для $\Delta T/T$. На последующих графиках значение -0.05 установлено в качестве верхней границы для $\Delta N/N$ и 0.03 — в качестве нижней границы для $\Delta T/T$, что позволяет исключить влияние шумов различного происхождения на результаты наблюдений.

Во второй Главе диссертационной работы исследованы результаты измерений спутников NorSat-1, DMSP F-17 и DMSP F-18 во время трех геомагнитных событий 18 марта 2018 года, 10 апреля 2018 года, 20 апреля 2018 года и 14 марта 2021 года, Dst которых составлял -20 , -21 , -32 и -15 нТл соответственно. К сожалению, в измерениях NorSat-1 имеется несколько пробелов, а в наборе данных DMSP F-18 отсутствуют данные об электронной температуре. Поскольку орбита NorSat-1 стабильная солнечно-синхронная и в ночном секторе она всегда находится около 00 MLT (Hoang et al., 2018), координата MLT спутника NorSat-1 на рисунках не указана.

Верхняя панель Рисунка 2.2 представляет результаты измерений спутником DMSP F-18 во время геомагнитного события 18 марта 2018 года в 19 UT. В области 61° – 63° геомагнитной широты в ~ 18 MLT, в самой глубокой точке провала электронной концентрации, наблюдается увеличение горизонтальной скорости дрейфа ионов в западном направлении до 3 км/с, вертикальной скорости дрейфа вверх до 200 м/с и температуры ионов до 0.4 эВ. Указанные выше скорости горизонтального и вертикального дрейфа, рост температуры ионов и широта 1.5° – 2° характерны для ПД (Anderson et al., 1991; Khalipov et al., 2016b). Таким образом, существование ПД во время рассматриваемого геомагнитного события в 18 MLT определяется однозначно. Из предыдущей Главы и работ (Spiro et al., 1979; Karlsson et al., 1998) известно, что в среднем ПД простирается по широте от ~ 02 до ~ 16 MLT, следовательно присутствие ПД в

точке 18 MLT указывает на присутствие ПД во всем ночном секторе, в том числе около 00 MLT, где спутник NorSat-1 проводил измерения.

Далее, на средней и нижней панелях Рисунка 2.2, представлены результаты измерений параметров $\Delta N/N$, $\Delta T/T$, электронной концентрации и температуры по данным спутника NorSat-1 во время геомагнитного события 18 марта 2018 года в 19 UT. ПД на этом рисунке находится в диапазоне 52.8° – 50.8° . При движении спутника от северного полюса к ПД, на средней панели Рисунка 2.2, наблюдается постепенное уменьшение электронной концентрации на порядок в области от 53.2° до 52.8° геомагнитной широты, за которым следует провал в области $\sim 52.8^\circ$ – 52° широты внутри ПД. Этот провал пространственно совпадает с увеличением электронной температуры примерно в 1.6 раз, согласно нижней панели Рисунка 2.2, а пик температуры совпадает с самой глубокой точкой провала на $\sim 52.6^\circ$ геомагнитной широты. Вышеперечисленные характеристики, присущие ПД, согласно предыдущим исследованиям, а также прямые измерения, полученные с помощью DMSP F-18, указывают на то, что рассматриваемое явление действительно является ПД. В пределах упомянутого провала электронной концентрации по параметрам $\Delta N/N$ и $\Delta T/T$ можно увидеть множество мелкомасштабных структур — страт поляризационного джета (Polarization Jet Stratum, PJS), из которых две самые крупные расположены на $\sim 52.8^\circ$ и $\sim 52.7^\circ$ и ширина которых составляет $<0.1^\circ$ широты. Кроме того, на средней панели Рисунка 2.2 в области 51.1° – 50.8° геомагнитной широты наблюдается второй провал электронной концентрации. Соответствующий ему по широте пик электронной температуры показан на нижней панели Рисунка 2.2. Следовательно, рассматриваемое явление можно назвать стратифицированным поляризационным джетом (СПД, SSAID, Stratified SAID), поскольку оно не является однородным ПД, а состоит из нескольких страт ПД электронной концентрации и температуры.

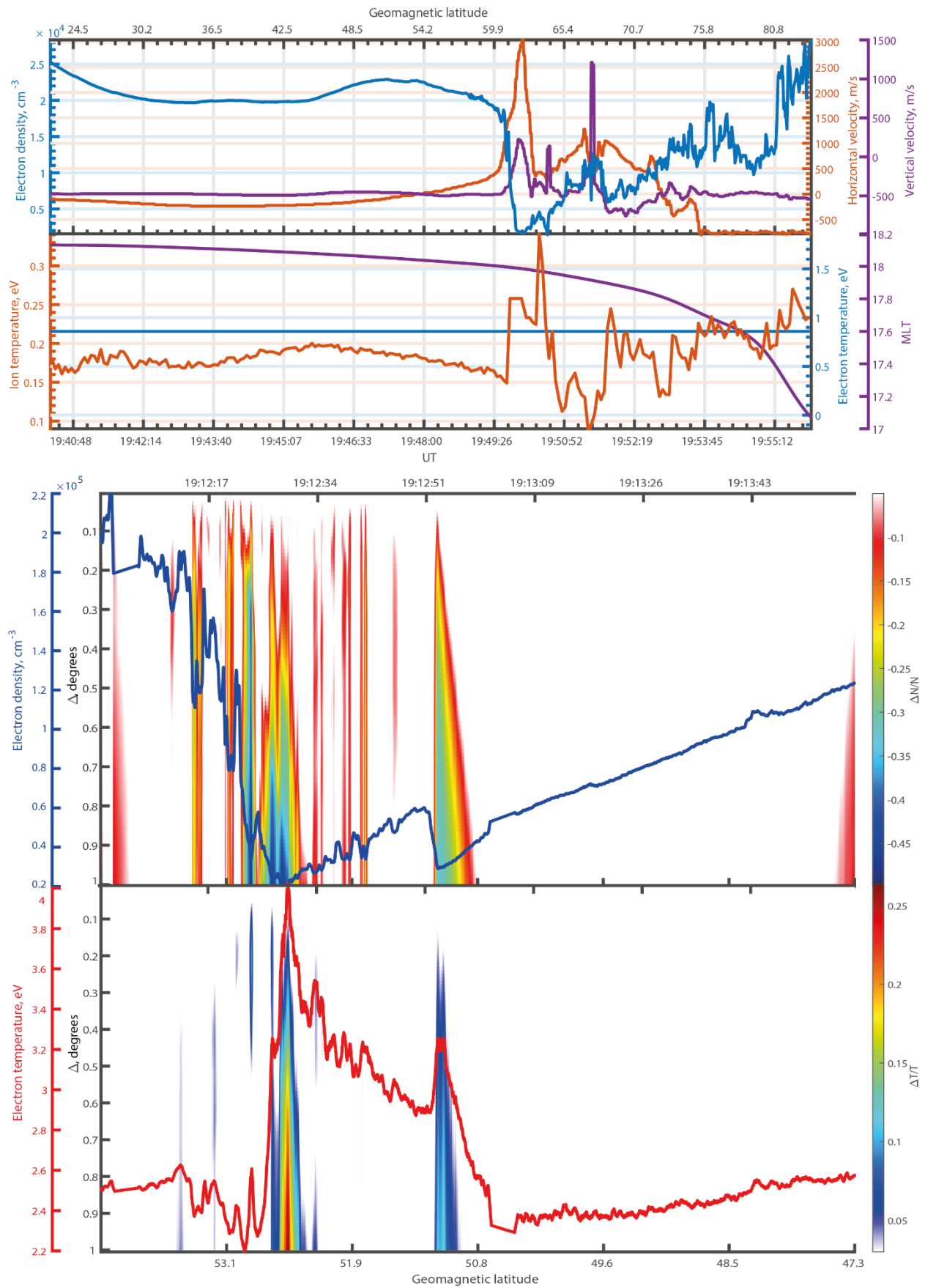


Рисунок 2.2 — Верхняя панель — Динамика горизонтальной (красная линия на верхнем графике) и вертикальной (фиолетовая линия на верхнем графике) скоростей дрейфа ионов, электронной концентрации (синяя линия на верхнем графике), температуры ионов (красная

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.

Измерения спутника DMSP F-18 во время геомагнитного события 10 апреля 2018 в 05 UT представлены на верхней панели Рисунка 2.3. Следует обратить внимание на то, что представленный пролет DMSP F-18 происходит в южном полушарии. Как известно из радарных наблюдений (Parkinson et al., 2005; Foster, Rideout, 2007; Kunduri et al., 2012) и измерений *in situ*, например (Burke et al., 2000; Puhl-Quinn et al., 2007; Mishin, 2013), если ПД или SAPS происходят в одном полушарии, то они одновременно наблюдаются и в другом полушарии на магнитно-сопряженных широтах. Следовательно, можно использовать данные южного полушария, чтобы убедиться в одновременном наличии ПД в северном полушарии во время повышенной геомагнитной активности. В диапазоне геомагнитных широт от -60.5° до -59.7° в секторе ~ 20 MLT наблюдается провал электронной концентрации, совпадающий по широте с увеличением скорости горизонтального дрейфа до 1.9 км/с, вертикального дрейфа до ~ 70 м/с и температуры ионов до 0.3 эВ. Характеристики рассматриваемого провала явно указывают на развитие ПД на ~ 20 MLT, что доказывает наличие ПД 10 апреля 2018 года на ~ 00 MLT в момент пролета спутника NorSat-1, где он измерял параметры плазмы, показанные на средней и нижней панелях Рисунка 2.3.

Средняя и нижняя панели Рисунка 2.3 демонстрируют, что СПД, состоящий из нескольких страт ПД электронной концентрации и температуры, по данным NorSat-1 занимает интервал геомагнитных широт 56.3° – 54.9° . Скорость уменьшения геомагнитной широты с ростом MLT составляет $\sim 1.25^\circ$ в час, что меньше, чем в первом рассмотренном случае. Это может быть связано с развитием геомагнитного возмущения, отличным от случая 18 марта 2018 года. Наиболее глубокий провал электронной концентрации расположен вблизи полярной стенки СПД на широте $\sim 56.3^\circ$. Согласно нижней панели Рисунка 2.3, наибольший пик температуры пространственно совпадает с наиболее глубоким провалом электронной концентрации. Кроме того, 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 СПД на средней и нижней панелях Рисунка 2.3 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° – 5.4° 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.

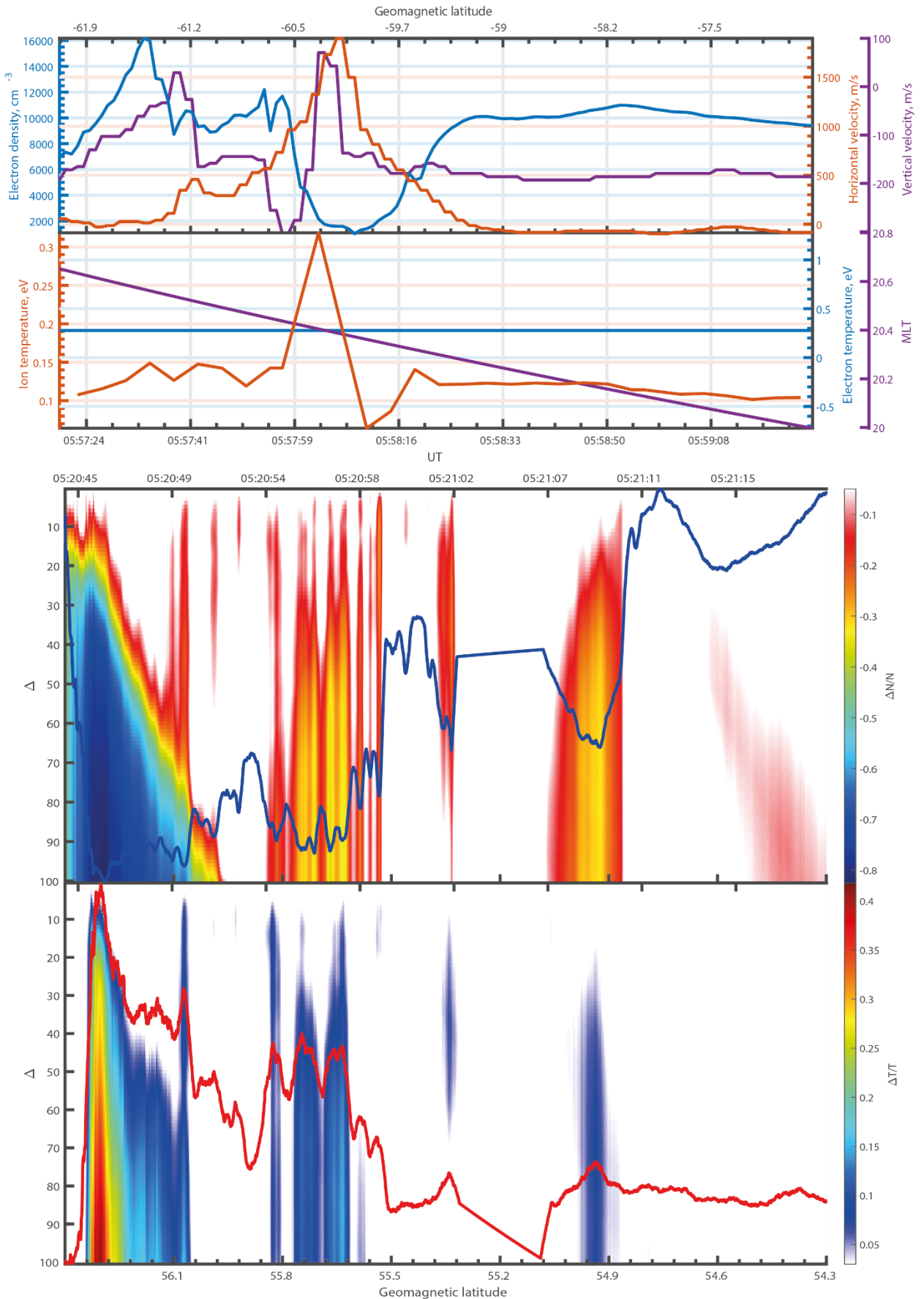


Рисунок 2.3 — Верхняя панель — Динамика горизонтальной (красная линия на верхнем графике) и вертикальной (фиолетовая линия на верхнем графике) скоростей дрейфа ионов, электронной концентрации (синяя линия на верхнем графике), температуры ионов (красная линия на нижнем графике) и электронов (синяя линия 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 в 05 UT 10 апреля 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 в 05 UT 10 апреля 2018 года.

Кроме того, было также проанализировано рассмотренное в первой Главе геомагнитное событие 20 апреля 2018 года, в этот раз с применением методов $\Delta N/N$ и $\Delta T/T$. Верхняя панель Рисунка 2.4 иллюстрирует результаты измерений спутником DMSP F-18 во время пролета 20 апреля 2018 года в 10 UT. В области 57.8° – 61° геомагнитной широты в секторе ~ 17 MLT присутствует провал электронной концентрации, пространственно совпадающий с увеличением скорости горизонтального дрейфа до 1 км/с, повышением ионной (до 0.33 эВ) и электронной (до 0.5 эВ) температур, что указывает на наличие ПД во время указанного геомагнитного события. Однако следует отметить, что во время рассматриваемого события скорость вертикального дрейфа, как было зафиксировано на спутнике DMSP F-18, внутри этого провала направлена вниз и достигает ~ 600 м/с, что не характерно для ПД (Anderson et al., 1991; Khalipov et al., 2016b).

Измерения электронной концентрации и температуры, а также $\Delta N/N$, $\Delta T/T$ во время пролета NorSat-1 20 апреля 2018 года в 10 UT представлены на средней и нижней панелях Рисунка 2.4. ПД, находящийся на 53.3° – 52.2° геомагнитной широты, состоит из структур (страт) размером 0.1° – 0.2° и, следовательно, является СПД. Скорость уменьшения геомагнитной широты с ростом MLT в данном случае составляет $\sim 0.6^\circ$ в час, что меньше, чем для двух других рассмотренных случаев. Это можно объяснить тем, что местоположение ПД на геомагнитной широте в плоскости MLT зависит от геомагнитной активности, которая для данного геомагнитного события значительно больше, чем для других рассматриваемых событий. Поскольку на широте 53.3° наблюдается настолько резкое падение электронной концентрации, что параметр $\Delta N/N$ перестает быть различимым для остальной части СПД (широта 52.9° – 52.3°), на Рисунке 2.4 приводится только экваториальная часть СПД без его полярной стенки. Средняя панель Рисунка 2.4 показывает, что рассматриваемая часть СПД внутри состоит из двух широких провалов электронной концентрации на геомагнитных широтах 52.9° – 52.7° и 52.7° – 52.4° . Как показано на нижней панели рисунка, эти провалы пространственно совпадают с подъемами электронной температуры примерно в 1.2 раза, пики

которых расположены на геомагнитных широтах 52.75° и 52.55° . Кроме того, экваториально от СПД на широтах 52.3° – 52.2° расположено еще одно повышение температуры. Геомагнитный индекс SME 20.04.2018 в интервале времени с 06 до 08 UT уменьшился с ~ 1500 нТл до ~ 800 нТл, следовательно, экваториальная граница аврорального овала и граница SEB сместились к полюсу. Соответственно, и сам СПД сместился к полюсу, а вызванная им область нагретых электронов оставалась на том же месте до 10 UT, когда произошел второй резкий подъем индекса SME до ~ 1500 нТл и сформировался очередной ПД/СПД на широтах 52.9° – 52.3° . Следовательно, повышение температуры в диапазоне широт 52.3° – 52.2° может быть остатком ПД/СПД, произошедшего во время предыдущего резкого повышения геомагнитной активности в 06 UT. На средней панели Рисунка 2.4 параметром $\Delta N/N$ подтверждается, что рассмотренные выше провалы электронной концентрации на геомагнитных широтах 52.9° – 52.7° и 52.7° – 52.4° шириной 0.1° и 0.3° широты соответственно представляют собой страты ПД, из которых состоит СПД. Таким образом, с учетом области с резким падением концентрации на полярной стенке СПД на 53.3° – 52.9° , СПД в рассматриваемом пролете состоит из трех крупных страт ПД электронной концентрации. Нижняя панель Рисунка 2.4 показывает, что в этом случае некоторые страты ПД электронной температуры не совпадают по широте со стратами ПД электронной концентрации.

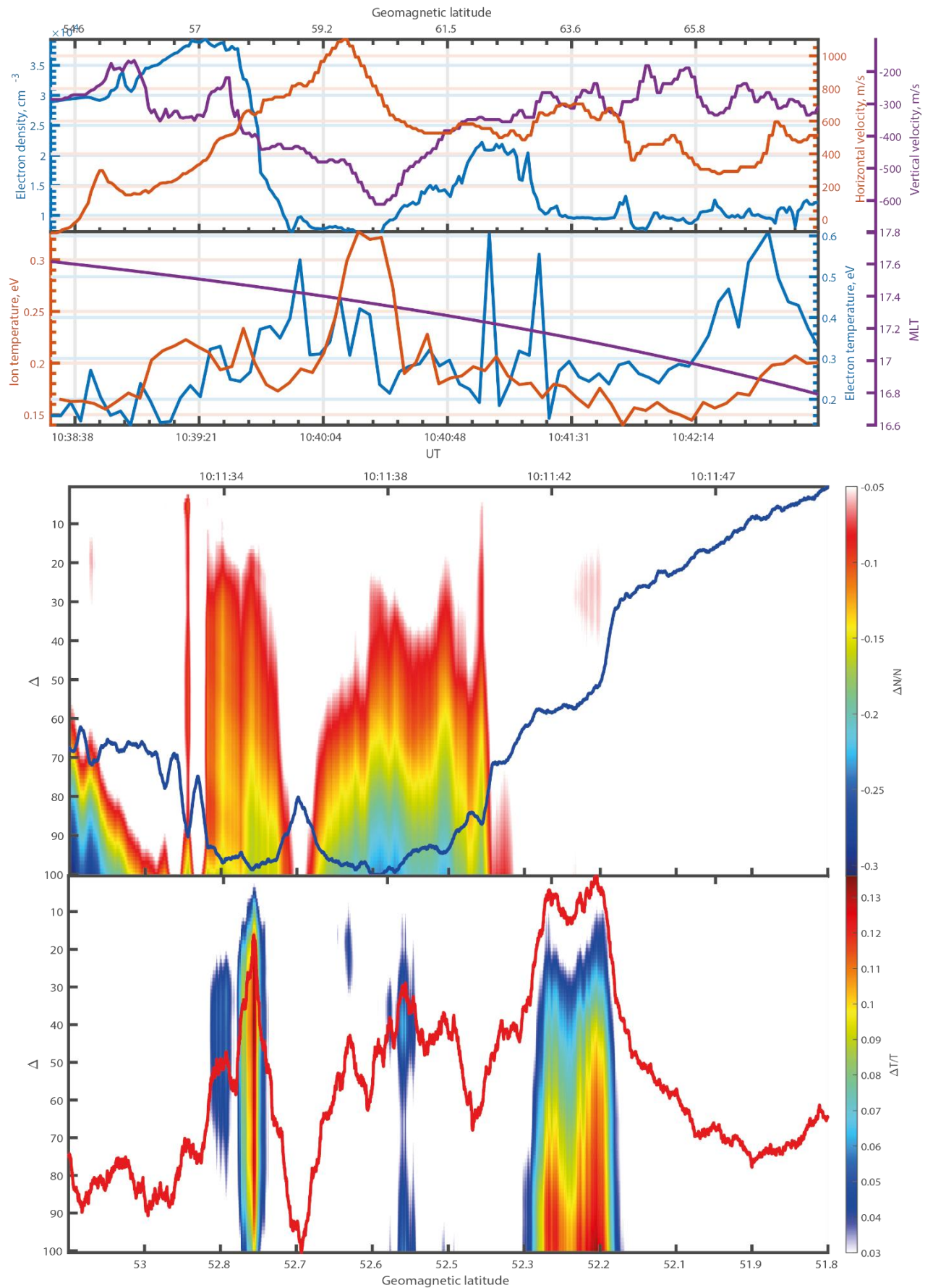


Рисунок 2.4 — Верхняя панель — Динамика горизонтальной (красная линия на верхнем графике) и вертикальной (фиолетовая линия на верхнем графике) скоростей дрейфа ионов, электронной концентрации (синяя линия на верхнем графике), температуры ионов (красная

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-17 в 10 UT 20 апреля 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 в 10 UT 20 апреля 2018 года.

На верхней панели Рисунка 2.5 представлены результаты измерений спутника DMSP F-16 во время геомагнитного события 14 марта 2021 года. На участке геомагнитных широт от -62.6° до -60.4° в секторе 19 MLT расположен провал электронной концентрации. Ближе к экваториальной стенке провала на геомагнитной широте -61.3° находится пик горизонтальной скорости дрейфа ионов (~ 600 м/с), совпадающий в пространстве с пиком вертикальной скорости дрейфа ионов (~ 100 м/с). На нижней панели рисунка на широтах от -62.6° до -61.3° наблюдается рост температуры ионов до ~ 0.3 эВ и электронов до ~ 0.4 эВ. Интересен тот факт, что рост температуры электронов и ионов пространственно не совпадает с пиком вертикальной и горизонтальной скоростей дрейфа и расположен на $\sim 0.6^\circ$ широты полярнее. Это может быть связано со значительно более низкой пространственной частотой измерений температур ионов и электронов (~ 0.25 Гц), чем пространственная частота измерений скоростей дрейфа (2 Гц) на спутнике серии DMSP. Скорость дрейфа ионов на запад в полосе ПД по сообщениям разных авторов составляет либо 500 м/с и выше (Spiro et al., 1979), либо 1000 м/с и выше (Anderson et al., 1991). Таким образом, горизонтальная скорость дрейфа ионов, равная 600 м/с, удовлетворяет критерию возникновения ПД из статьи (Spiro et al., 1979). Более того, о присутствии ПД на рассматриваемых широтах говорит пространственное совпадение провала электронной концентрации с пиком горизонтальных скоростей дрейфа ионов (Spiro et al., 1979; Anderson et al., 1991) и вертикальных скоростей дрейфа ионов (Khalipov et al., 2016b). Заметим, что пространственно совпадающее положение пика дрейфов ионов и пика ионных и электронных температур также свойственно ПД (Anderson et al., 1991).

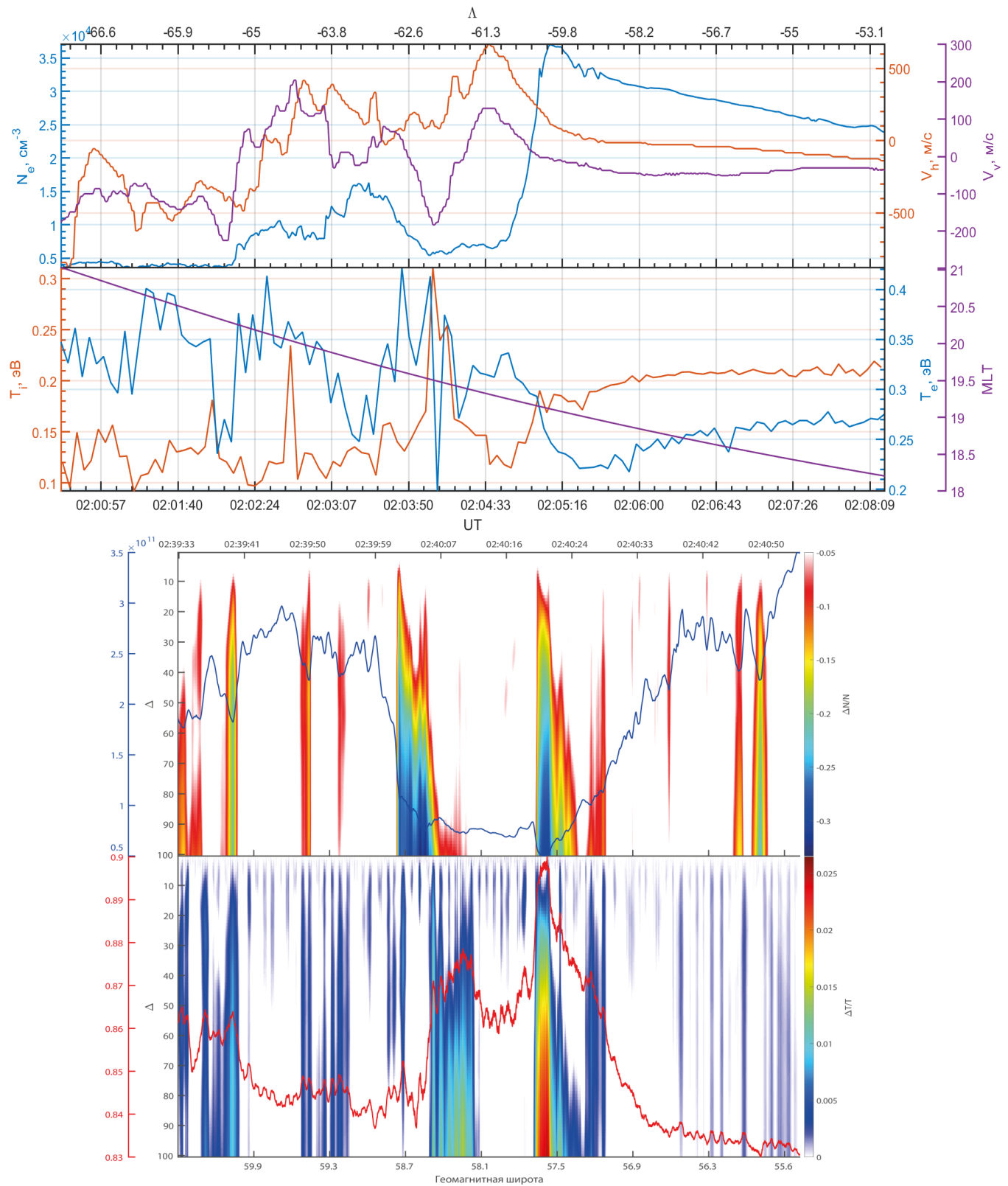


Рисунок 2.5 — Верхняя панель — Динамика горизонтальной (красная линия на верхнем графике) и вертикальной (фиолетовая линия на верхнем графике) скоростей дрейфа ионов, электронной концентрации (синяя линия на верхнем графике), температуры ионов (красная линия на нижнем графике) и электронов (синяя линия 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-16 в 02 UT 14 марта 2021 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 в 02 UT 14 марта 2021 года.

На средней и нижней панелях Рисунка 2.5 показаны результаты измерений спутника NorSat-1 во время геомагнитной активности 14 марта 2021 года в 02 UT. На участке геомагнитных широт 59.9° – 58.3° концентрация электронов ниже фонового уровня в 2.5 раза, и внутри данного провала заметен подъем температуры электронов, что дополнительно подтверждает, что на данном участке располагается ПД. По температуре внутри ПД наблюдается два отдельных пика. Схожие пики температуры электронов по данным NorSat-1 обнаружены во и во время других геомагнитных событий, рассмотренных ранее, и интерпретированы как крупные страты стратифицированного поляризационного джета (СПД). На средней панели Рисунка 2.5 по изменению параметра $\Delta N/N$ внутри СПД на широтах $\sim 58.7^\circ$ и $\sim 57.6^\circ$ видны две крупные страты ПД электронной концентрации размером в $\sim 0.3^\circ$, а также несколько мелких страт ПД размером менее 0.1° широты. На нижней панели рисунка по изменению параметра $\Delta T/T$ внутри СПД страты ПД электронной температуры пространственно соответствуют стратам ПД электронной концентрации, кроме крупной страты, расположенной у полярной стенки ПД. Полярная страта электронной температуры сдвинута по широте в сторону экватора на $\sim 0.3^\circ$ относительно страты электронной концентрации. Это может быть объяснено задержкой по времени между снижением концентрации электронов в полосе дрейфа и разогревом в ней заряженных частиц, поскольку с течением времени расположение экваториальной границы авроральной области, а как следствие и ПД, сдвигается в сторону полюса или экватора в зависимости от развития геомагнитной активности. В промежутке с 02 по 03 UT 14 марта 2021 года индекс SME снизился с -10 нТл до -23 нТл, в результате чего расположение экваториальной границы аврорального овала сдвинулось в сторону полюса. Таким образом, в сторону полюса сдвинулась полярная граница ПД, что, в свою очередь, отразилось на положении провала электронной концентрации.

2.2.3 Вейвлет-анализ

Помимо метода $\Delta N/N$ в рамках второй Главы диссертационной работы для исследования страт ПД и мелкомасштабных неоднородностей внутри них был использован вейвлет-анализ измерений спутника NorSat-1. 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 (Haar, 1910):

$$\psi(x) = \begin{cases} 1, & 0 \leq x < 1/2 \\ -1, & 1/2 \leq x < 1. \\ 0, & x \notin (0, 1) \end{cases} \quad (53)$$

Считается, что вейвлет Хаара оптимален для описания резких изменений в сигнале, когда имеются градиенты и разрывы в значениях, а также в задачах поиска экстремумов сигнала (Haar, 1910). С использованием вейвлет-анализа проанализировано четыре геомагнитных события, для которых имеются спутниковые данные NorSat-1: два уже рассмотренных в предыдущем разделе события 18 марта 2018 года и 10 апреля 2018 года, а также два новых — 16 апреля 2018 года и 09 апреля 2018 года.

На Рисунке 2.6 показаны измерения спутника NorSat-1 и спектрограммы мощности вейвлет-преобразования электронной концентрации и температуры при пролете через ПД во время геомагнитной активности 18 марта 2018 года в 19 UT (см. также Рисунок 2.2). Участок повышенной интенсивности на средней панели Рисунка 2.6 на промежутке 53.5° – 52.5° связан с резким перепадом значения концентрации на полярной стенке ГИП. На спектрограмме электронной температуры (нижняя панель Рисунка 2.6) наблюдается два участка повышения интенсивности неоднородностей температуры с пространственными размерами вплоть до 350–1000 м на экваториальном участке и до нескольких сотен метров на полярном участке. Эти участки пространственно совпадают со стратами ПД электронной концентрации и температуры на геомагнитных широтах 52.5° – 51.7° и 51° – 50.5° . При этом, следует отметить, на спектрограмме электронной концентрации повышение интенсивности на участках, совпадающих со стратами ПД практически незаметно.

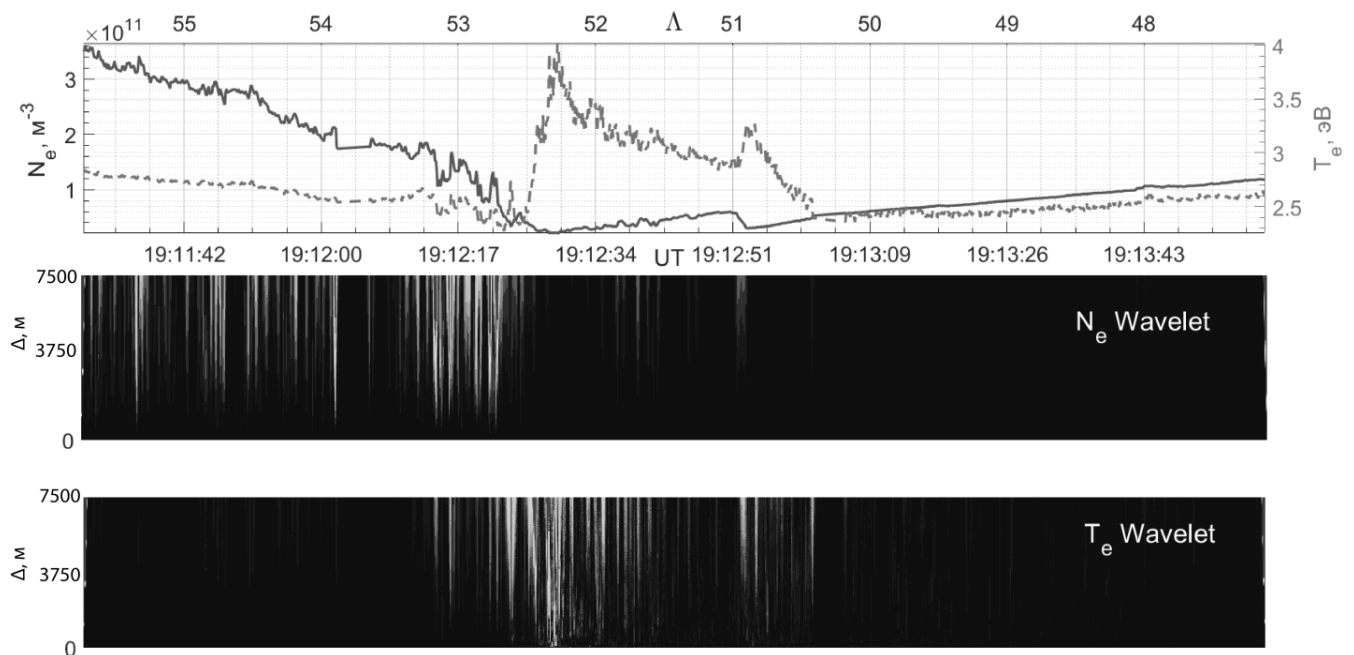


Рисунок 2.6 — Верхняя панель — изменение концентрации электронов (сплошная линия), температуры электронов (штриховая линия) от геомагнитной широты (верхняя ось абсцисс) и времени UT (нижняя ось абсцисс) по данным спутника NorSat-1 во время геомагнитного события 18 марта 2018 года в 19 UT. Средняя панель — спектрограмма мощности вейвлет-преобразования электронной концентрации по данным спутника NorSat-1. Нижняя панель — спектрограмма мощности вейвлет-преобразования электронной температуры по данным спутника NorSat-1.

Таким образом, на примере данного геомагнитного события показано, что использование вейвлет-преобразования применимо для исследования внутренней структуры СПД, в частности, крупных страт ПД, как минимум по данным электронной температуры. Кроме того, анализ спектрограмм вейвлет-преобразования позволяет оценить минимальный пространственный размер неоднородностей внутри страт ПД.

На Рисунке 2.7 приведены результаты измерений спутника NorSat-1 и спектрограммы мощности вейвлет-преобразования электронной концентрации и температуры при пролете через ПД во время геомагнитной активности 10 апреля 2018 года в 05 UT (см. также Рисунок 2.3). На средней панели Рисунка 2.7, так же, как и в предыдущем рассмотренном случае, на спектрограмме вейвлет-преобразования электронной концентрации мелкомасштабные неоднородности внутри СПД менее интенсивны, чем на спектрограмме электронной температуры. На нижней панели Рисунка 2.7 хорошо видно внутри СПД несколько десятков мелких страт ПД. Размеры неоднородностей температуры внутри страт ПД варьируются от сотен метров до километра.

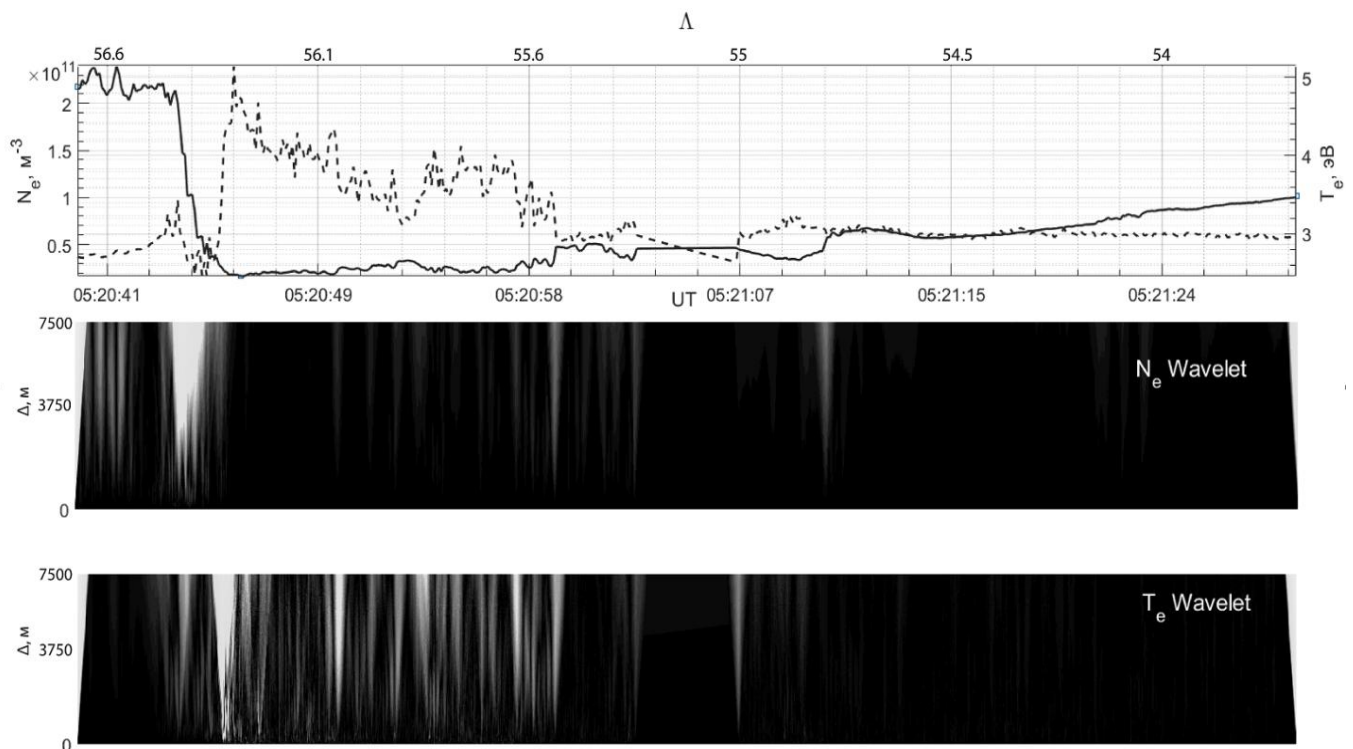


Рисунок 2.7 — Верхняя панель — изменение концентрации электронов (сплошная линия), температуры электронов (штриховая линия) от геомагнитной широты (верхняя ось абсцисс) и времени UT (нижняя ось абсцисс) по данным спутника NorSat-1 во время геомагнитного события 10 апреля 2018 года в 05 UT. Средняя панель — спектрограмма мощности вейвлет-преобразования электронной концентрации по данным спутника NorSat-1. Нижняя панель — спектрограмма мощности вейвлет-преобразования электронной температуры по данным спутника NorSat-1.

Данные пролетов NorSat-1 во время геомагнитных возмущений 16 марта 2018 года и 09 апреля 2018 года представлены на Рисунках 2.8 и 2.9 соответственно. Значения скоростей дрейфа ионов для этих двух событий, в отличие от двух предыдущих (Рисунки 2.2 и 2.3), не представлены, поскольку во время данных геомагнитных событий отсутствуют данные пролетов спутников программы DMSP с подходящими параметрами орбиты. Таким образом, в этих случаях подтверждение наличия ПД в рассматриваемые моменты времени возможно на основании многих предыдущих исследований по известным признакам и характерным свойствам ПД.

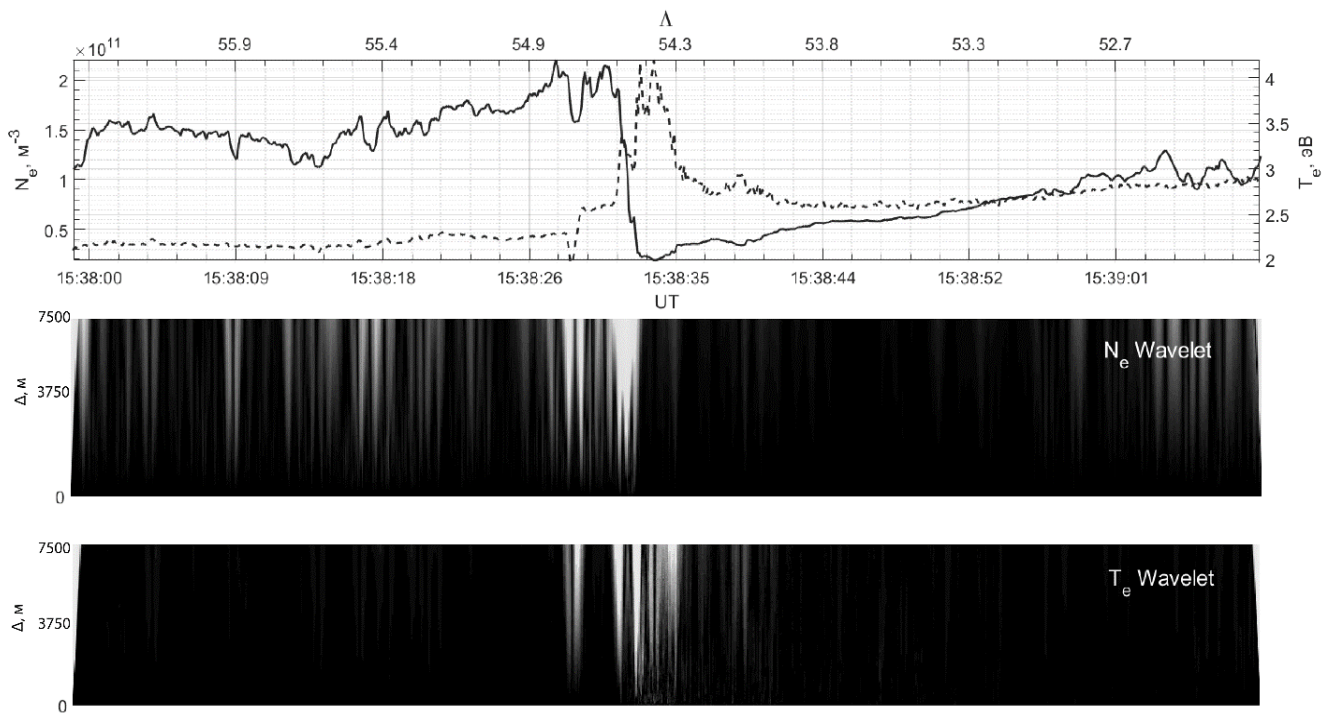


Рисунок 2.8 — Верхняя панель — изменение концентрации электронов (сплошная линия), температуры электронов (штриховая линия) от геомагнитной широты (верхняя ось абсцисс) и времени UT (нижняя ось абсцисс) по данным спутника NorSat-1 во время геомагнитного события 16 марта 2018 года в 15 UT. Средняя панель — спектрограмма вейвлет-преобразования электронной концентрации по данным спутника NorSat-1. Нижняя панель — спектрограмма вейвлет-преобразования электронной температуры по данным спутника NorSat-1.

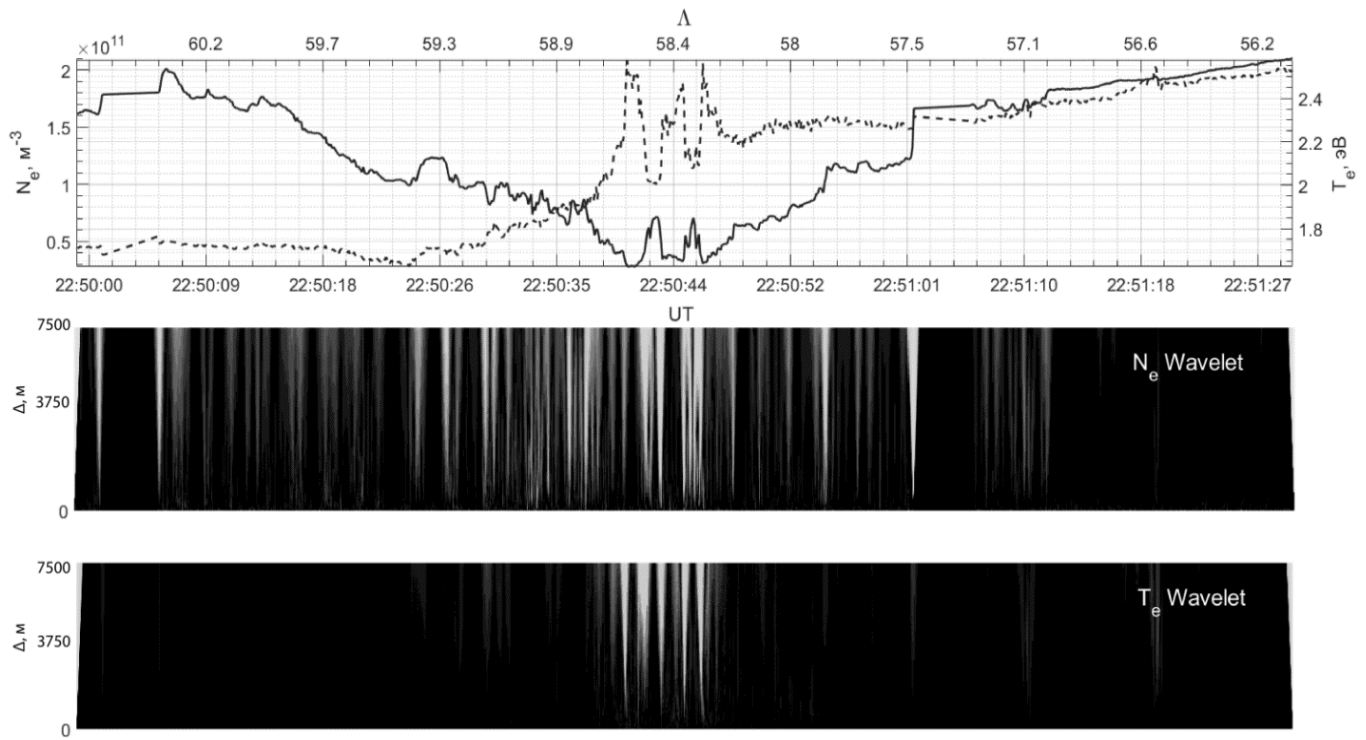


Рисунок 2.9 — Верхняя панель — изменение концентрации электронов (сплошная линия), температуры электронов (штриховая линия) от геомагнитной широты (верхняя ось абсцисс) и времени UT (нижняя ось абсцисс) по данным спутника NorSat-1 во время геомагнитного события 09 апреля 2018 года в 22 UT. Средняя панель — спектрограмма вейвлет-преобразования электронной концентрации по данным спутника NorSat-1. Нижняя панель — спектрограмма вейвлет-преобразования электронной температуры по данным спутника NorSat-1.

На верхней панели Рисунка 2.8 на 54.5° наблюдается резкое падение электронной концентрации в $\sim 3\text{--}4$ раза относительно фонового уровня авроральных широт при движении от Южного полюса в сторону экватора. Провал электронной концентрации простирается в сторону экватора до $\sim 53^\circ$, при этом экваториальная граница провала гораздо менее резкая, чем полярная, поэтому ее положение не определено. ГИП обычно располагается на субавроральных геомагнитных широтах $50^\circ\text{--}70^\circ$, его полярная стенка обычно более резкая, чем экваториальная, и падение электронной концентрации относительно фона внутри провала составляет от 3 до 10 раз (Muldrew, 1965; Ahmed et al., 1979; Moffet, Quegan, 1983; Karpachev et al., 1996). Таким образом, можно утверждать, что спутник NorSat-1 16 марта 2018 года в 15 UT пересекал ГИП на геомагнитных широтах $54.5^\circ\text{--}53^\circ$. Внутри ГИП на его полярной стенке наблюдается углубление провала электронной концентрации на участке геомагнитных широт $54.5^\circ\text{--}54.3^\circ$, пространственно совпадающее с ростом электронной температуры в ~ 2 раза. Наличие подобной структуры электронной концентрации и температуры на полярной стенке ГИП на

субавроральных широтах в полуночном секторе (00 MLT) явно указывает на то, что данная структура представляет собой ПД.

На средней панели Рисунка 2.8 представлена спектрограмма вейвлет-преобразования электронной концентрации по данным спутника NorSat-1 во время геомагнитной активности 16 марта 2018 года в 15 UT. Как и во время геомагнитных событий 18 марта 2018 года, 10 апреля 2018 года, рассмотренных выше, на спектрограмме электронной концентрации плохо видно наличие страт ПД внутри СПД, как и наличие мелкомасштабных флуктуаций внутри страт ПД. На нижней панели Рисунка 2.8 на геомагнитных широтах ПД (54.5° – 54.3°), являющегося СПД, хорошо заметно, что имеется около десятка мелких страт ПД электронной температуры. При этом минимальный пространственный размер неоднородностей электронной температуры меньше у полярной стенки СПД и составляет десятки-сотни метров, в то время как у экваториальной стенки неоднородности составляют несколько сотен метров и больше.

На верхней панели Рисунка 2.9 располагается широкий (от 60° до 57.5° геомагнитной широты) провал электронной концентрации. Расположение на субавроральных широтах и пространственный размер по широте (2.5° широты) свидетельствует о том, что данный провал представляет собой ГИП. Следует отметить отсутствие резкой полярной стенки ГИП. ПД во время данного геомагнитного события находится в нижней точке ГИП и совпадает с подъемом электронной температуры на участке геомагнитных широт 58.74° – 58.16° , внутри которого заметно три участка падения концентрации, совпадающих с ростом электронной температуры и являющихся крупными стратами ПД, на 58.74° – 58.48° , 58.48° – 58.32° и 58.32° – 58.17° геомагнитных широтах. На средней панели наблюдается множество участков неоднородностей электронной концентрации и температуры, большое количество из которых отражает наличие мелкомасштабных неоднородностей в ГИП. Внутри СПД пространственный размер неоднородностей электронной концентрации достигает десятков-сотен метров. На нижней панели Рисунка 2.9 по спектрограмме вейвлет-преобразования электронной температуры наблюдается наличие около десятка мелких страт ПД, минимальный пространственный размер неоднородностей в которых составляет сотни метров.

2.3 Обсуждение

Во второй Главе диссертационной работы исследована мелкомасштабная структура ПД во время шести различных геомагнитных событий. Каждый из рассмотренных ПД состоял из страт электронной концентрации и температуры и, соответственно, являлся новым, впервые обнаруженным, типом ПД, обнаруженным в текущей работе — стратифицированным поляризационным джетом (СПД). С использованием параметров $\Delta N/N$ и $\Delta T/T$ можно

определить пространственные размеры страт ПД (Рисунок 2.10). Размер крупных страт ПД, как правило, находится в пределах 0.1° – 0.3° широты, а размер мелких составляет $<0.1^{\circ}$ широты. В среднем СПД состоит из 2–4 крупных страт ПД, число мелких страт ПД может варьироваться от нескольких единиц до нескольких десятков. При этом на примере случая 14 марта 2021 года показано, что страты ПД электронной температуры не всегда пространственно совпадают со стратами ПД электронной концентрации и бывают сдвинуты по широте. Эти структуры, обнаруженные внутри нескольких СПД, впервые изучены нами по наблюдениям с высоким пространственным разрешением с помощью измерений прибора m-NLP на борту спутника NorSat-1.

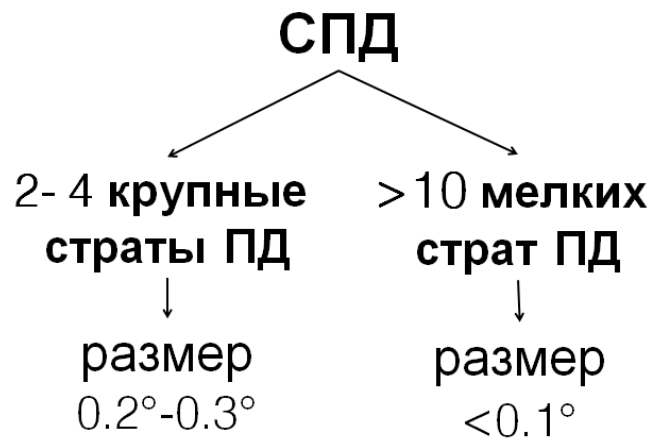


Рисунок 2.10 — Характерный состав СПД и размеры его страт.

Механизм образования страт ПД, как и точный механизм образования ПД, остается открытым вопросом на сегодняшний день. Образование страт внутри СПД может иметь тот же механизм, что и генерация самого ПД, но в меньших масштабах. Например, основываясь на механизме «генератор тока» (Anderson et al., 1993), можно предположить, что неоднородность плотности R2 FAC приводит к неоднородному уменьшению проводимости Педерсена F-слоя ионосферы. Это, в свою очередь, вызывает стратифицированный $E \times B$ дрейф на запад, состоящий из страт $<0.1^{\circ}$ и 0.1° – 0.3° широты, которые практически невозможно обнаружить с помощью дрейфметра с низкой частотой дискретизации. Аналогичное объяснение механизма образования предложено в работе (He et al., 2016) и развито в работе (Horvath, Lovell, 2017) для DSAID, пики которого расположены на среднем расстоянии 1.1° широты друг от друга. Согласно теории, предложенной авторами, взаимодействие волна-частица создает двухслойную структуру R2 FAC, которая затем замыкается двумя контурами в ионосфере, вызывая два пика ПД. Возможно, страты ПД образуются по тому же принципу, но в гораздо меньших масштабах ($<0.1^{\circ}$ и 0.1° – 0.3° широты). Механизм возникновения ПД, названный «генератор напряжения» (Southwood, Wolf, 1978; Galperin, 2002) предполагает разделение зарядов инжектированной плазмы плазменного слоя. В таком случае СПД могут возникать, если инжекция имеет

сложную стратифицированную структуру. Кроме того, механизм генерации ПД (СПД) может представлять собой комбинацию механизмов, представленных в работах (Southwood, Wolf, 1978; Galperin, 2002) и (Anderson et al., 1993). Например, на стадии развития суббури разделение зарядов порождает ПД как генератор напряжения, а затем, на стадии восстановления суббури, падение проводимости Педерсена «питает» ПД как генератор тока. Таким образом, возможно, что страты ПД внутри СПД генерируются и поддерживаются неоднородностями R2 FAC.

Существование запрещенных зон траекторий связано с образованием так называемых «носовых структур» протонов во внутренней магнитосфере, когда энергичные ионы могут проникать в нижние L-оболочки после суббуревой инжекции (Ejiri, 1978; Ganushkina et al., 2000; Buzulukova et al., 2002). Наблюдение «носовых структур» связано с наличием суббуревой активности. Ранее отмечалось (Khalipov et al., 2001; Galperin, 2002), что вблизи области инжекции в околополуночном секторе MLT в широком диапазоне энергий наблюдаются ионы без дисперсии, а в вечернем секторе — с дисперсией в виде «носовых структур», а вблизи экваториальной границы проникновения энергичных ионов в магнитосферу наблюдается ПД. Скорость градиентного дрейфа ионов с энергией ~ 20 кэВ, формирующих «носовую структуру», близка к скорости смещения на запад переднего фронта формирования ПД. Очевидно, существует корреляция между событиями ПД и «носовыми структурами», а развитие «носовых структур» в магнитосфере Земли также может быть ответственно за существование СПД.

Модель, предложенная в (de Keyser et al., 1998) и (de Keyser, 1999), как сказано в первой Главе, не подтверждается данными, поскольку размер всего ПД в таком случае должен был бы составлять 0.02 широты°. Однако этот механизм может приводить к образованию небольших страт ПД, составляющих СПД, размер которых $< 0.1^\circ$. Согласно (Mishin et al., 2010) в теории «короткого замыкания» (Mishin, Puhl-Quinn, 2007) канал ПД, по которому замыкаются заряды из плазмоида, представляет собой проекцию TPBL с неустойчивой смесью популяций горячих ионов и холодной плазмы (Mishin, 2013). Таким образом, возможно, что развитие турбулентности может быть причиной наличия мелкомасштабных процессов в ПД. Некоторые авторы также предполагают, что механизмы ионосферной обратной связи в системе магнитосфера-ионосфера (Jia, Streltsov, 2014; Streltsov, Mishin, 2018a, 2018b) важны для поддержания и регулирования ПД (Mishin, Streltsov, 2019, 2022). Неустойчивость ионосферной обратной связи внутри ПД генерирует мелкомасштабные FAC и электрические поля, нелинейно возрастающие с ростом ПД и амплитудой истощения плазмы. Наличие холловской проводимости (когда холловская проводимость, создаваемая высыпавшимися энергичными электронами, превышает проводимость Педерсена) создает систему вращающихся

ионосферных токов и электрических полей, созданных неустойчивостью ионосферной обратной связи, что приводит к образованию цепочки мелкомасштабных вихрей, напоминающих ряд структур внутри СПД (Mishin, Streltsov, 2019, 2022). Таким образом, неустойчивость ионосферной обратной связи может быть причиной возникновения мелкомасштабных структур внутри СПД. (Mishin et al., 2003) и (Mishin, Burke, 2005) исследовали предложенные ими SAPSWS, образованные альфвеновскими и быстрыми магнитозвуковыми возмущениями. Численное моделирование неустойчивости ионосферной обратной связи, проведенное (Streltsov, Mishin, 2003, 2018a, 2018b), воспроизвело наблюдаемые особенности SAPSWS в различных суббуревых событиях. Страты ПД могут иметь схожую природу, но в меньшем пространственном масштабе, и связь между SAPSWS и стратами ПД требует дальнейших исследований. Кроме того, образование страт ПД может быть вызвано плазменными неустойчивостями, вызванными сильным (сверхзвуковым) дрейфом ионов и обсуждаемыми в разделе 1.4 первой Главы диссертационной работы.

Помимо таких методов как $\Delta N/N$ и $\Delta T/T$, при анализе нестационарных сигналов ограниченной длины удобно использовать оконное Фурье- и вейвлет-преобразование. Согласно принципу неопределенности, применяя оконное преобразование Фурье, добиться сколь угодно значительной локализации мощности сигнала во времени можно только за счет потери локализации спектральной функции по частоте. Это справедливо и для вейвлет-преобразования, однако преимущество вейвлет-преобразования заключается в большей гибкости базисных функций, так как размер частотно-временных окон в этом случае не является фиксированным. Это позволяет одновременно и локализовать во времени резкие градиенты или разрывы в сигнале, и выполнять достаточно детальный частотный анализ на большом временном промежутке, имея один и тот же набор базисных функций. В терминах традиционного анализа сигналов фильтры, связанные с оконным преобразованием Фурье, называют фильтрами с постоянной полосой пропускания, тогда как вейвлеты можно рассматривать как фильтры с постоянной относительной полосой пропускания, поскольку их ширины по обеим переменным линейно зависят от их положения (Дремин и др., 2001). Применение вейвлет-анализа нашло широкое практическое применение в разнообразных задачах физики околоземного пространства, в том числе и в ионосфере, например, (Головчанская и др., 2012; Lund, 2010; Chernyshov et al., 2013, 2017; Чернышов и др., 2013; Чугунин и др., 2020). Четыре случая из шести, рассмотренных во второй Главе настоящей работы, были проанализированы с использованием вейвлет-преобразования с базовой функцией Хаара, поскольку считается, что эта базисная функция наиболее подходит для определения резких градиентов и разрывов сигнала (Haar, 1910).

По спектрограммам мощности вейвлет-преобразования наблюдаются как мелкие страты ПД, так и неоднородности параметров плазмы внутри них с пространственными размерами от нескольких километров до десятков-сотен метров. При этом, как правило, страты ПД по электронной температуре наблюдаются лучше, чем по электронной концентрации. Это может быть связано с тем, что перепад значения у резкой полярной стенки ПД электронной концентрации имеет высокую амплитуду в вейвлет-преобразовании, на фоне которого плохо заметны более мелкие структуры внутри ПД. Как показано в данном исследовании, минимальный пространственный размер неоднородностей электронной температуры меньше, чем электронной концентрации. Следует также отметить, что минимальный размер неоднородностей внутри СПД меньше у его полярной стенки, где, как правило, расположен самый глубокий провал электронной концентрации внутри ПД и ГИП (Galperin, 2002).

2.4 Выводы

Основные результаты второй Главы диссертационной работы:

- Впервые обнаружено новое явление — стратифицированный ПД (СПД), состоящий из мелкомасштабных страт внутри, которые не являются локальными и растянуты по MLT как минимум на 2 часа. Возможно, что любой ПД состоит из страт.
- Определены типичные размеры страт ПД. Крупные страты имеют размер 0.2° – 0.3° широты, мелкомасштабные страты имеют размер $<0.1^{\circ}$. Как правило, СПД состоит из 2–4 крупных страт и от нескольких единиц до нескольких десятков мелких страт ПД.
- Внутри страт ПД присутствуют неоднородности в концентрации и температуре электронов с пространственными размерами вплоть до сотен метров;
- 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.

Глава 3. Влияние поляризационного джета на прохождение радиосигнала

3.1 Введение к Главе 3

По результатам первой и второй Глав диссертационной работы стало известно, что ПД может иметь сложную внутреннюю структуру в виде страт и мелкомасштабных неоднородностей параметров плазмы в большом спектре пространственных размеров. Эти плазменные неоднородности, совместно с резкой полярной стенкой связанного с ПД провала электронной концентрации и разогревом плазмы, должны влиять на условия распространения радиоволн в субавроральной ионосфере, что, в свою очередь, влияет как на традиционную длинноволновую радиосвязь, так и на сигнал спутников Глобальных Навигационных Спутниковых Систем (ГНСС). В третьей Главе данной работы проведено исследование влияния ПД и его внутренней структуры на прохождение через него радиоволн с помощью сигналов спутников ГНСС и зондирующего сигнала ионозондов в приполярных/субавроральных областях южного и северного полушария.

Полярные и субполярные области ионосферы Южного полушария, особенно вокруг Антарктиды, являются наименее изученными на сегодняшний день. Это обусловлено главным образом тем, что влияние различных ионосферных эффектов на распространение радиосигналов, в том числе сигналов навигационных спутников, изучалось преимущественно для северного полушария, где имеется густая сеть наземных приемников, радаров, ионозондов и других приборов. В последнее время темпы развития международных и региональных программ исследования Антарктиды возрастают, как и необходимость обеспечения надежного функционирования радиотехнических систем в Антарктиде. Важно отметить, что субавроральная область находится примерно у побережья Антарктиды, где расположено значительное количество полярных станций (некоторые из которых имеют взлетно-посадочные полосы для доставки грузов и персонала) и наблюдается относительно интенсивное судоходство. Поэтому необходимо понимать процессы, происходящие в ионосфере, чтобы избегать или прогнозировать потенциальные проблемы с радиосвязью и снижением точности позиционирования в навигационных системах, а также с их возможными сбоями. В текущей Главе впервые изучено, как сильные турбулентные потоки, возникающие в субавроральной ионосфере южного полушария во время развития ПД, влияют на сбои (блокировку радиосигналов от спутников ГНСС) в спутниковых навигационных системах и приводят к сцинтилляциям («мерцаниям») в принимаемом сигнале на Земле.

Для комплексного исследования влияния ПД на сигнал спутников ГНСС используется уникальный мультиинструментальный подход, включающий большое количество приборов и

источников данных. С его помощью в текущей Главе всесторонне изучен ПД во время геомагнитного возмущения 18 марта 2018 года и последующие сцинтилляции и потери сигналов спутников ГНСС. Это возмущение уже было рассмотрено ранее во второй Главе текущей работы, в данной Главе исследованы случаи ПД в другие времена UT этого дня. При анализе были использованы данные трех космических миссий (NorSat-1, DMSP, Swarm), данные двух сцинтилляционных приемников, установленных в Антарктиде, и данные магнитометров. Столь богатый набор инструментов позволил детально изучить эффекты в субавроральной области во время присутствия ПД и их влияние на работу ГНСС, а также получить новые результаты, актуальные не только для Антарктиды, но и для Арктики, поскольку многие процессы происходят одновременно в полярных зонах при переменной геомагнитной активности.

Сцинтилляции сигнала, проходящего через ионосферу, традиционно определяются индексами S_4 и σ_ϕ следующим образом (Fremouw et al., 1978; Yeh, Liu, 1982):

$$S_4 = (\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2) / \langle I \rangle^2, \quad (54)$$

$$\sigma_\phi = \langle \phi^2 \rangle - \langle \phi \rangle^2, \quad (55)$$

где I — интенсивность сигнала (квадрат амплитуды); ϕ — фаза сигнала; $\langle \rangle$ — скользящее среднее с окном (традиционно — 60 с). Индекс S_4 , определяемый как нормированная дисперсия интенсивности сигнала, является индикатором мелкомасштабных неоднородностей на уровне и ниже радиуса Френеля ($r_F = \sqrt{\lambda L}$, где λ — длина волны и L — расстояние между приемником и неоднородностью) (Yeh, Liu, 1982). σ_ϕ — стандартное отклонение измеренной фазы, которое является индикатором структурирования плазмы в больших и малых масштабах (Rino, 1979). На высоких широтах наблюдения возмущений фазы принимаемого сигнала преобладают над наблюдениями возмущений амплитуды сигнала. Фазовые сцинтилляции часто наблюдаются вблизи ГИП и вблизи границы аврорального овала, в частности, около магнитной полуночи (Spogli et al., 2009; Skjæveland et al., 2021). Они также наблюдаются в полярной шапке на краях сильных градиентов плотности (Mitchell et al., 2005; Moen et al., 2013). Амплитудные и фазовые сцинтилляции часто достигают максимума вблизи градиентов полного электронного содержания (ПЭС, TEC — total electron content) на краях плазменных пятен, что указывает на наличие мелкомасштабных неоднородностей, и могут также быть связаны с языком ионизации (de Franceschi et al., 2008). В (Prikrýl et al., 2015) обнаружено наибольшее количество сцинтилляций в северном полушарии в полярной шапке и на ночной стороне аврорального овала. Авторы также отмечают, что с увеличением солнечной и геомагнитной активности фазовые сцинтилляции становятся более частыми и присутствуют как к полюсу, так и к экватору от аврорального овала. Важно отметить, что индекс фазовой сцинтилляции σ_ϕ чувствителен к скорости дрейфа плазмы (Beach, 2006; Wang et al., 2018), это означает, что в

полосе быстрого ионного дрейфа, например связанного с ПД, следует ожидать сильные фазовые сцинтилляции. В следующем разделе работы будут рассмотрены и амплитудный (S4) и фазовый (σ_ϕ) индексы сцинтилляций сигналов ГНСС по измерениям сцинтилляционных приемников в Антарктиде (Kotova et al., 2025).

Кроме влияния на сцинтилляции сигналов ГНСС, в данной Главе рассмотрено влияние ПД на прохождение зондирующего сигнала ионозондов. Ионозонды, особенно ионосферные цепочки, могут быть одним из наиболее полезных инструментов для изучения ПД среди наземных методов. Ионозонд представляет собой устройство, состоящее из приемника и передатчика зондирующих импульсов, которое определяет высоту слоев ионосферы по времени запаздывания приема отраженного от ионосферы сигнала относительно излученного:

$$h \approx \frac{\tau * c}{2} \text{ км}, \quad (56)$$

где τ — время между излучением радиоволны и приемом его после отражения; c — скорость света.

Поскольку скорость распространения радиоволн равна скорости света только в неионизированной части атмосферы, определяется не истинная, а так называемая «кажущаяся» или «действующая» высота отражения.

Отражение радиоволн происходит при совпадении частоты волны с плазменной частотой ионосферного слоя:

$$\varepsilon = 1 - \frac{N_e q^2}{m \pi f^2}, \quad (57)$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{f_p^2}{f^2}, \quad (58)$$

где ε — диэлектрическая проницаемость среды; N_e — концентрация электронов; f — частота электромагнитной волны; f_p — плазменная частота. При зондировании на разных частотах получается высотно-частотная характеристика — ионограмма, которая является в некотором роде вертикальным срезом ионосферы над ионозондом (Рисунок 3.1).

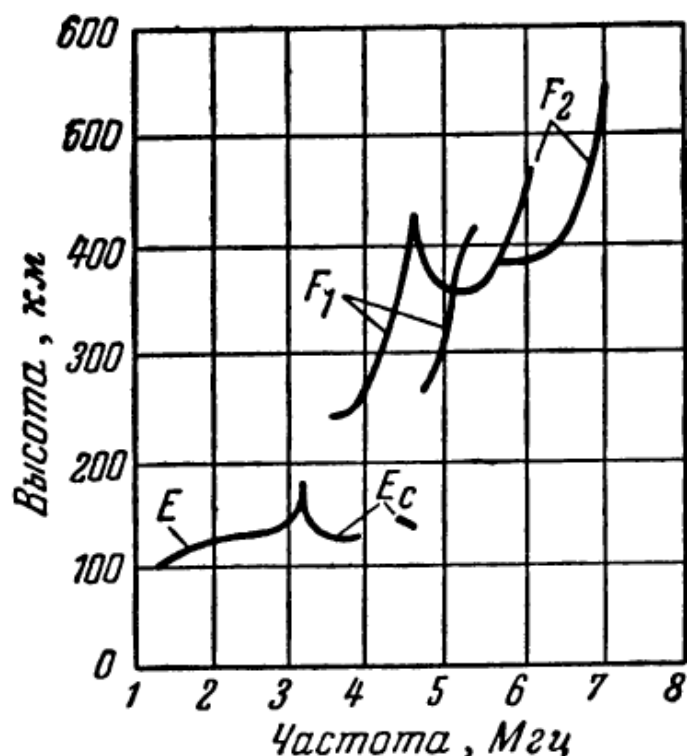


Рисунок 3.1 — Схематично представленная высотно-частотная характеристика (ионограмма), получаемая с помощью ионозонда.

Страты ПД и неоднородности параметров внутри них могут объяснить изменения в ионограммах во время возникновения ПД. Далее было рассмотрено геомагнитное событие 18 марта 2018 года в северном полушарии, где разнообразный набор данных позволяет оценить наличие связи между неоднородной структурой ПД (по данным наблюдений спутников DMSP, NorSat-1 и Swarm) и ее отражением на ионограммах расположенных в России и Северной Европе наземных ионозондов, а также измерениями магнитометра и приемника сигналов GPS/ГЛОНАСС.

Магнитометр Западного филиала Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН), установленный в магнитно-ионосферной обсерватории Ладушкин в Калининградской области, измеряет изменения компонент магнитного поля Земли. Поскольку для ПД характерен пик изменения горизонтальной компоненты магнитного поля Земли (δB_H) (Степанов и др., 2017), данные магнитометра могут быть использованы для локализации ПД по времени во время рассматриваемого события.

Данные приемников GPS/ГЛОНАСС в регионе наблюдения ПД позволяют построить локальные карты ПЭС, чтобы визуализировать, как ПД отражается на этих картах и можно ли их использовать для обнаружения ПД. ПЭС представляет собой суммарное количество электронов в столбе единичного сечения вдоль траектории прохождения сигнала через ионосферу:

$$TEC = \int n_e(s) ds. \quad (59)$$

В настоящее время ПЭС определяется в основном по фазовым измерениям сигналов спутников ГНСС на двух частотах:

$$TEC = \frac{1}{40.38} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [(L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2) + const_{1,2} + \sigma L], \quad (60)$$

где f_1 и f_2 — рабочие частоты ГНСС; L_1 и L_2 — число оборотов фазы на соответствующей частоте; λ_1 и λ_2 — длины волн; $const$ и σL — неоднозначность и ошибка фазовых измерений. Для каждого луча «спутник-приемник» определяются следующие параметры: полное электронное содержание (ПЭС), азимут, угол места и координаты подионосферной точки. На основе этого набора данных для всех лучей формируются карты ПЭС. Для связи между наземными станциями и спутниками, а также для спутниковой навигации, показатель ПЭС является удобным параметром для мониторинга возможных воздействий космической погоды. Кроме того, ПЭС широко используется в науке для исследования ионосферы в целом и физических явлений в ней (Chernyshov et al., 2020a; Padokhin et al., 2025; Danilchuk et al., 2025). Стоит добавить, что событие 18 марта 2018 года примечательно тем, что во время этой магнитной бури на субавроральных широтах в Северной Европе наблюдался не только ПД, но и STEVE. Как было указано ранее, присутствие STEVE указывает на наличие сильного ПД, совпадающего с ним в пространстве (MacDonald et al., 2018). В данной Главе для комплексного исследования ПД в северном полушарии представлены измерения не только ионозондов, но и ПЭС в Калининградской области (Sinevich et al., 2024).

3.2 Сцинтилляции и потери спутниковых навигационных сигналов

Поскольку известно, что ПД может быть источником различных неоднородных структур в ионосфере, необходимо понять, возможно ли отследить их влияние на качество трансionoсферных радиосигналов и, следовательно, на позиционирование с помощью ГНСС. Кроме того, важно отделить эти эффекты от эффектов, возникающих из-за неоднородностей, вызванных высыпанием энергетических частиц во время полярных сияний.

В третьей Главе были рассмотрены геомагнитные условия, близкие к весеннему равноденствию 18 марта 2018 года, в период низкой солнечной активности, когда наблюдалось умеренное геомагнитное возмущение с максимумом $K_p = 6$, $SYM-H = -53$ нТл и максимумом индекса A_E в 1600 нТл. В вечернем секторе местного времени в этот момент функционировал комплекс спутниковых и наземных приборов, позволивший идентифицировать наличие ПД, и это стало определяющим фактором для сосредоточения внимания на этом событии. Большой объем доступных спутниковых данных пролил свет на важные детали, связанные со

структурами в субавроральной области. Чтобы проверить, насколько сильным может быть влияние структурирования плазмы в ПД и какое ПД оказывает влияние на сцинтилляции сигналов ГНСС, были использованы данные с двух сцинтилляционных приемников GNSS Ionospheric Scintillation and TEC Monitor (GISTM) в Антарктиде: SANAЕ IV (SAN, географические координаты — 71.7° ю. ш., 2.8° з. д.) и Troll (TRL, географические координаты — 72.0° ю. ш., 2.5° в. д.), которые располагаются на экваториальной границе аврорального овала в геомагнитно невозмущенное время. На станции SANAЕ IV установлен приемник NovAtel GSV4004B, эксплуатируемый Южноафриканским национальным космическим агентством (SANSA). В декабре 2017 года на норвежской исследовательской станции Troll в рамках ионосферной обсерватории, управляемой Университетом Осло, был установлен приемник NovAtel GPStation-6. Этот приемник регистрирует сигналы со спутников GPS, ГЛОНАСС и Galileo и каждую секунду выдает необработанные данные наблюдений, включая измерения фазы и амплитуды с частотой 50 Гц и измерения ПЭС с частотой 1 Гц. Исходные измерения фазы были очищены от тренда с помощью фильтра верхних частот Баттерворта 6-го порядка с частотой среза 0.1 Гц (Skjæveland et al., 2021). Приемник NovAtel GSV4004B регистрирует сигналы только от спутников GPS. Помимо индексов сцинтилляции S4 и σ_f , также использован параметр времени синхронизации, который указывает, как долго приемник следует за спутником и синхронизирован с несущей фазой сигнала. Для пересчета координат точек прокола ионосферы (ionospheric piercing point, IPP) на высоте 350 км использовались подход тонкого ионосферного слоя и координаты AACGM (Altitude Adjusted Corrected Geomagnetic) (Li et al., 2018). Высота 350 км выбрана, поскольку ПД наиболее выражен в F-области ионосферы. Для обоих приемников использованы данные с частотой 1 Гц (для индексов сцинтилляции) типа сигнала L1 (для соответствия разрешению данных SANAЕ IV) и пороговые значения угла возвышения 10° , чтобы собрать максимальное количество данных, охватывающих области, расположенные экваториальнее аврорального овала.

ПД вблизи с указанными сцинтилляционными приемниками был обнаружен 18 марта 2018 года и 25 марта 2018 года по измерениям ряда низкоорбитальных спутников — NorSat-1, Swarm B, Swarm C, DMSP F-18 и DMSP F-17. Относительное расположение пролетов спутников и наземных станций в геомагнитных координатах AACGM во время геомагнитного события 18 марта 2018 года показано на Рисунке 3.2. Спутник DMSP F-17 в момент обнаружения на нем ПД по данным дрейфметра в $\sim 21:25$ UT 18 марта 2018 года находился в северном полушарии, на Рисунке 3.2 показаны координаты пролета и ПД в магнитно-сопряженной точке в южном полушарии.

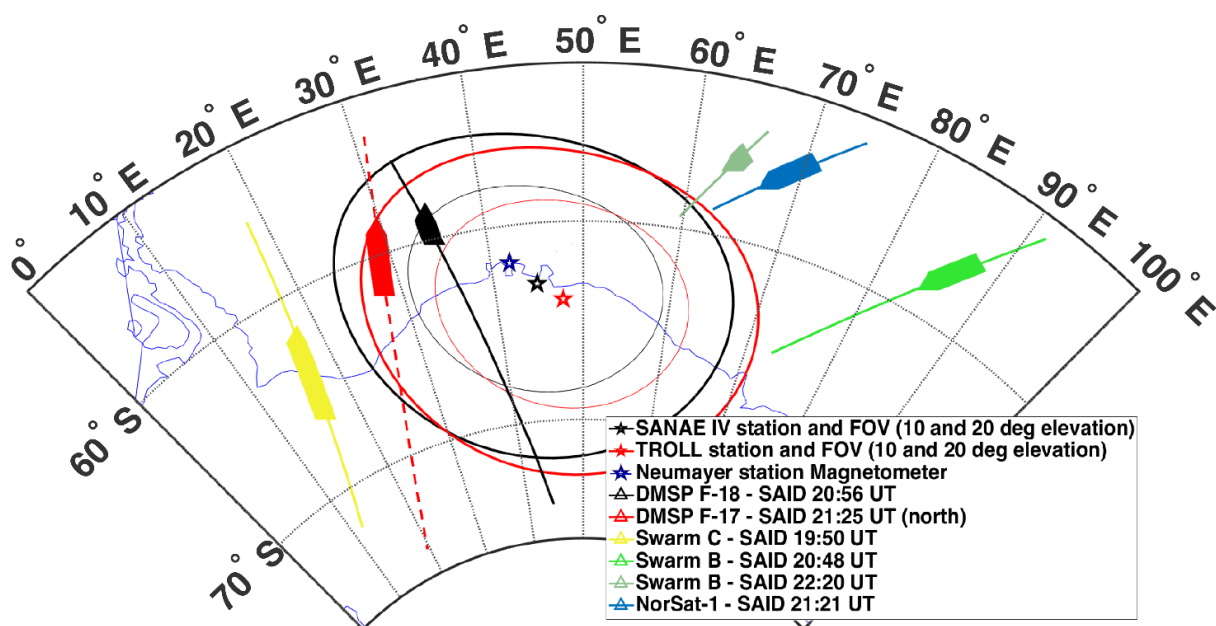


Рисунок 3.2 — Координаты пролетов низкоорбитальных спутников NorSat-1, Swarm и DMSP, а также станций сцинтилляционных приемников Troll и SANA E IV и магнетометра Neumayer в Земле Королевы Мод в Антарктиде 18 марта 2018 года. Красной пунктирной линией показана проекция вдоль геомагнитных линий пролета спутника DMSP F-17 в северном полушарии. Положение ПД показано толстыми срезами траекторий пролета. Звездочками обозначены сцинтилляционные приемники и магнетометр, а проекции полей зрения с углом возвышения 10° и 20° на высоте 350 км представлена кругами (черный — станция SANA E, красный — станция Troll).

Данные магнитометров станций SANA E IV и Neumayer (географические координаты — 70.7° южной широты, 8.3° западной долготы) использованы для определения ионосферной токовой системы (Рисунок 3.3). Вариации N-компоненты в рассматриваемый период имели одинаковый вид со сменой полярности (от положительной к отрицательной), что может указывать на наличие ПД. Аналогичное поведение N-компоненты во время прохождения ПД наблюдалось ранее на станции Якутск, как сообщалось в работе (Степанов и др., 2017). В их исследовании было указано, что быстрое образование ПД через 10 мин после начала фазы расширения суббури сопровождалось биполярной магнитной вариацией, аналогичной быстрому прохождению разрыва Харанга над станцией. Таким образом, магнитные вариации N-компоненты на станциях SANA E IV и Neumayer указывают на возможное образование ПД в ходе этого геомагнитного события.

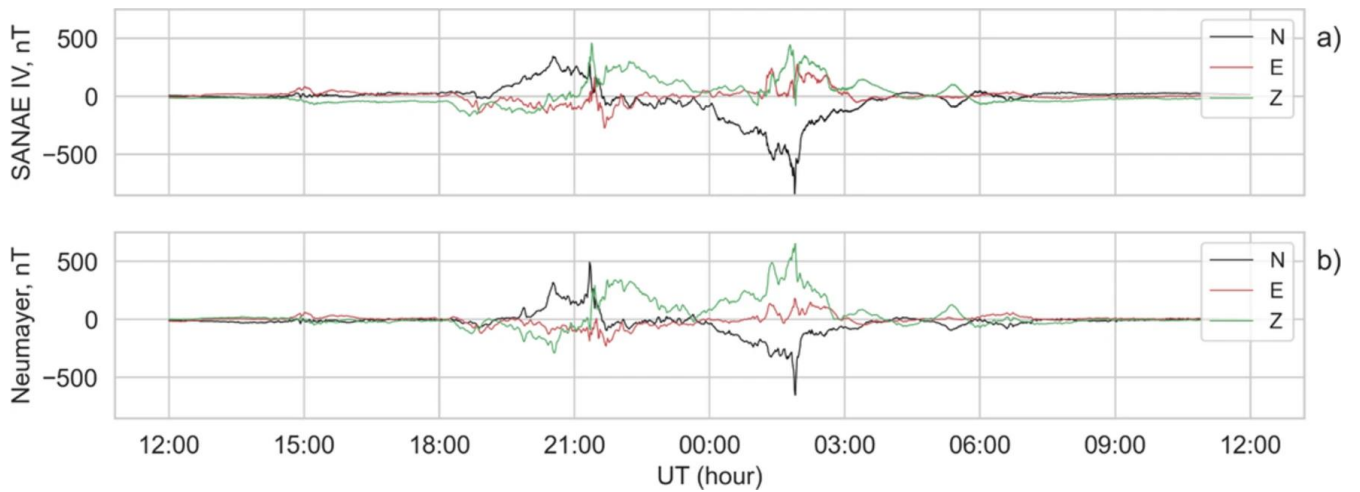


Рисунок 3.3 — Данные магнитометра в координатах NEZ со станций SANA IV (a) и Neumayer (b) за 18 и 19 марта 2018 года. B_N -компонента представлена черной линией, B_E — красной линией, B_Z — зеленой линией.

Помимо данных дрейфметра для определения границ аврорального овала были использованы измерения прибора SSUSI на борту спутников DMSP. Поскольку изображения SSUSI строятся в динамическом режиме (требуется около 20 минут съемки), изображение границ высыпающихся частиц в УФ-диапазоне показывает среднее расположение диффузного и дискретного полярных сияний. На Рисунке 3.4 представлены УФ-снимки полярных сияний, полученные с помощью прибора SSUSI на борту спутника DMSP F-18 когда он вышел на новую орбиту с южного полюса в 20:45 UT в направлении экватора. Траектория DMSP F-18 показана черной линией, а участок с ПД отмечен толстой линией. Аналогичным образом показаны пролеты других низкоорбитальных спутников: Swarm B, Swarm C и DMSP F-17, а также NorSat-1. Индексы фазовой сцинтилляции σ_ϕ , наблюдаемые с помощью приемников GISTM, представлены в точках, соответствующих IPP на высоте 350 км (кружки для TRL и квадраты для SNA), а интенсивность σ_ϕ обозначена цветом в соответствии с цветовой шкалой. Значения σ_ϕ на Рисунке 3.4 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 спутниковым данным и теории, находится ПД.

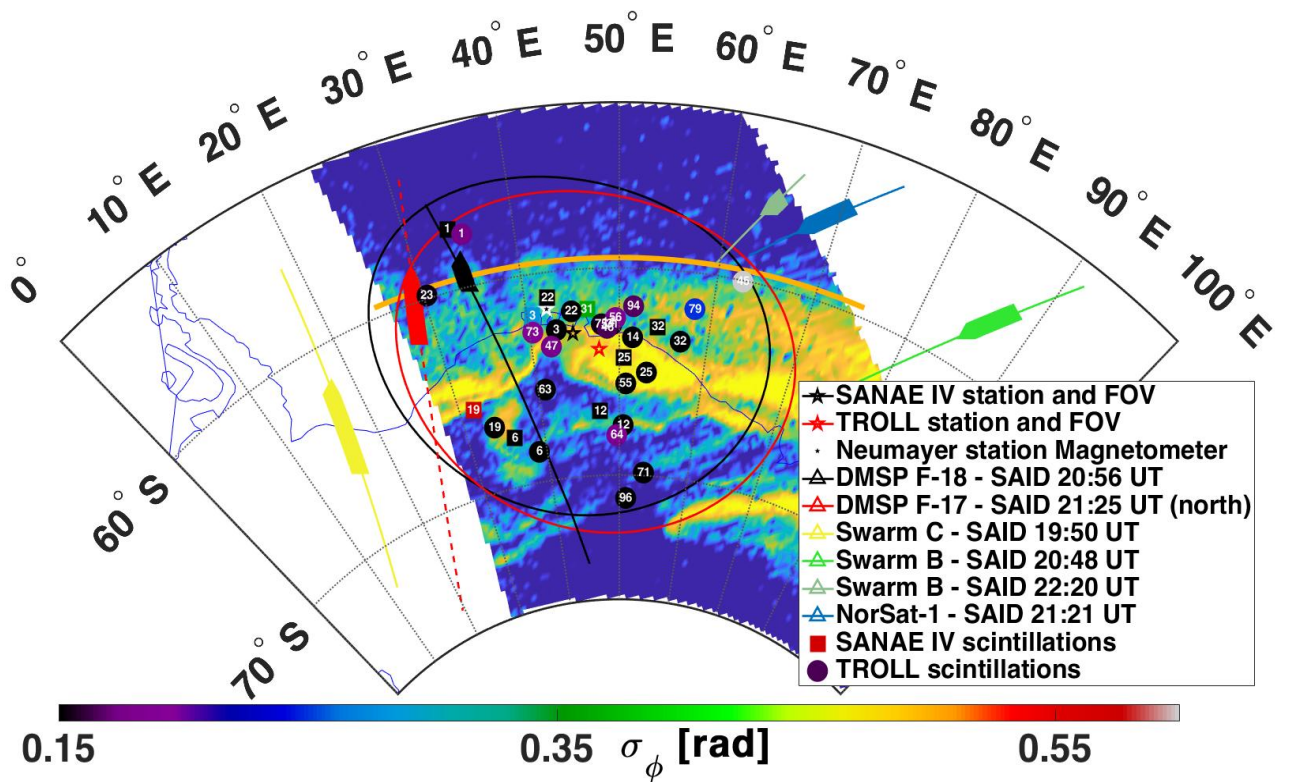


Рисунок 3.4 — Мультиинструментальное изображение влияния ПД на фазовые сцинтилляции сигналов спутников ГНСС в 21:25 UT. УФ-снимки аврорального излучения в геомагнитных координатах AACGM, полученные с помощью прибора SSUSI, установленного на борту спутника DMSP F-18, пролетающего над районом Земли Королевы Мод (Антарктида) во время геомагнитного события 18 марта 2018 года. Обозначения расположения пролетов спутников и станций соответствуют обозначениям Рисунка 3.2. Оранжевая линия показывает приблизительную 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 обозначены наблюдения с помощью приемника TRL, квадратами — наблюдения с помощью приемника SNA.

При детальном анализе графиков и результатов внимание было сосредоточено на отдельных спутниках ГНСС, которые показали экстремальные значения индекса σ_ϕ :

— станция Troll: спутник PRN 45 в 21:23 UT, спутник PRN 49 в 21:50 и 21:52 UT, спутник PRN 46 в 22:39, 22:46 и 22:50 UT, а также спутник PRN 73 двумя часами позже в 01:19 UT.

— станция SANA E IV: спутник PRN 1 в 21:30 UT и спутник PRN 14 в 22:59 и 23:01 UT. PRN (Pseudo-Random Noise) — уникальный идентификационный код, присвоенный конкретному спутнику для кодового разделения каналов (CDMA) в системах GPS, ГЛОНАСС и Galileo. Коды 1–40 соответствуют спутниковой системе GPS, 40–70 — ГЛОНАСС, 70 и выше — Galileo. В обычной практике анализа данных о сцинтилляциях высокие значения индекса σ_ϕ

следует удалять из набора данных, поскольку соответствующие им значения времени синхронизации составляют менее 240 с. Однако в данном случае это означает, что в какой-то конкретный момент приемник не может отслеживать спутник. В рассматриваемом случае такие спутники были объединены тем, что они:

- потеряны приемником, и позиционирование было нарушено, так что начался новый отсчет времени слежения;
- находились в районе, где располагался ПД;
- потеряны при малых углах возвышения (менее 25°).

Анализ данных за другое время и за другие дни (Рисунок 3.5a) показал, что у спутника PRN 1 приемника SANAЕ IV наблюдается постоянный сбой фазового слежения в одном и том же месте. Это, по-видимому, может быть связано с локальными особенностями условий вблизи приемника. То же самое справедливо и для спутника PRN 49 приемника Troll, где примерно в одном и том же месте, с временными сдвигами из-за орбит спутников, также наблюдался сбой слежения (Рисунок 3.5b). Это указывает на помехи, связанные с областью вокруг приемника, а не с состоянием окружающей среды вдоль пути сигнала от спутника ГНСС к наземному приемнику. Еще четыре спутника — PRN 45, 46, 14 и 73 — указывают на сбой, связанный с изменениями в ионосфере (Рисунок 3.5c–f). Кроме того, в области, где нарушается захват спутника PRN 45, через 1.5 часа захват спутника PRN 14 также прекращается (Рисунок 3.5d,e).

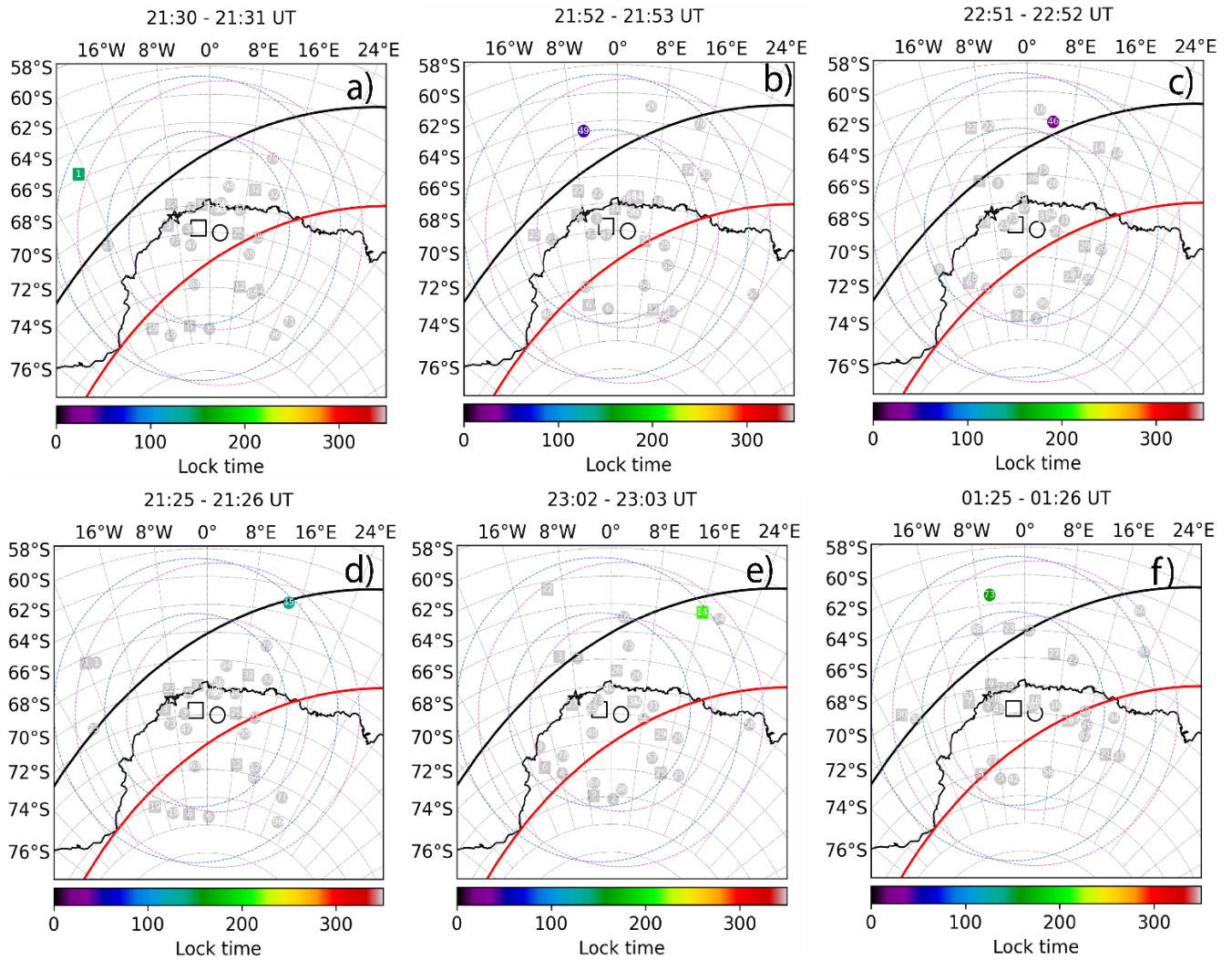


Рисунок 3.5 — Потери захвата сигнала (цветовая шкала) при прохождении его через область ПД. Красной линией отмечена 65° широты AACGM, черной линией — 60°. Остальные обозначения соответствуют Рисункам 3.2 и 3.4.

При детальном рассмотрении динамики видно, что в 21:08 UT (Рисунок 3.6a) индексы фазовой сцинтилляции σ_ϕ начинают увеличиваться на линии, параллельной геомагнитной изолинии, приблизительно на 62°–63° южной широты над приемниками. Значения σ_ϕ более 0.45–0.5 рад считаются умеренными и указывают на наличие интенсивного сцинтилляционного события (Linty et al., 2018). Значения, превышающие 1 рад, считаются признаком сильной сцинтилляции. Как показано в (Linty et al., 2018), сильные сцинтилляции могут приводить к ошибкам позиционирования порядка 10 м. Быстрые фазовые сцинтилляции могут вызывать доплеровский сдвиг в сигнале GPS, что приводит к потере фазовой синхронизации (потере захвата, loss of lock) (Leick, 1995). Увеличение σ_ϕ над станциями и в направлении к полюсу связано с неустойчивостями сдвига потока, которые вызываются высыпанием частиц аврорального овала, как показали авторы (Skjæveland et al., 2021), которые также рассматривали это событие. Следует отметить, что индекс амплитудной сцинтилляции S4 более чувствителен в

зоне дискретного полярного сияния, однако повышенные значения S4 также наблюдаются у спутников, проходящих через зону экваториальной границы диффузного полярного сияния, где обычно наблюдается ПД.

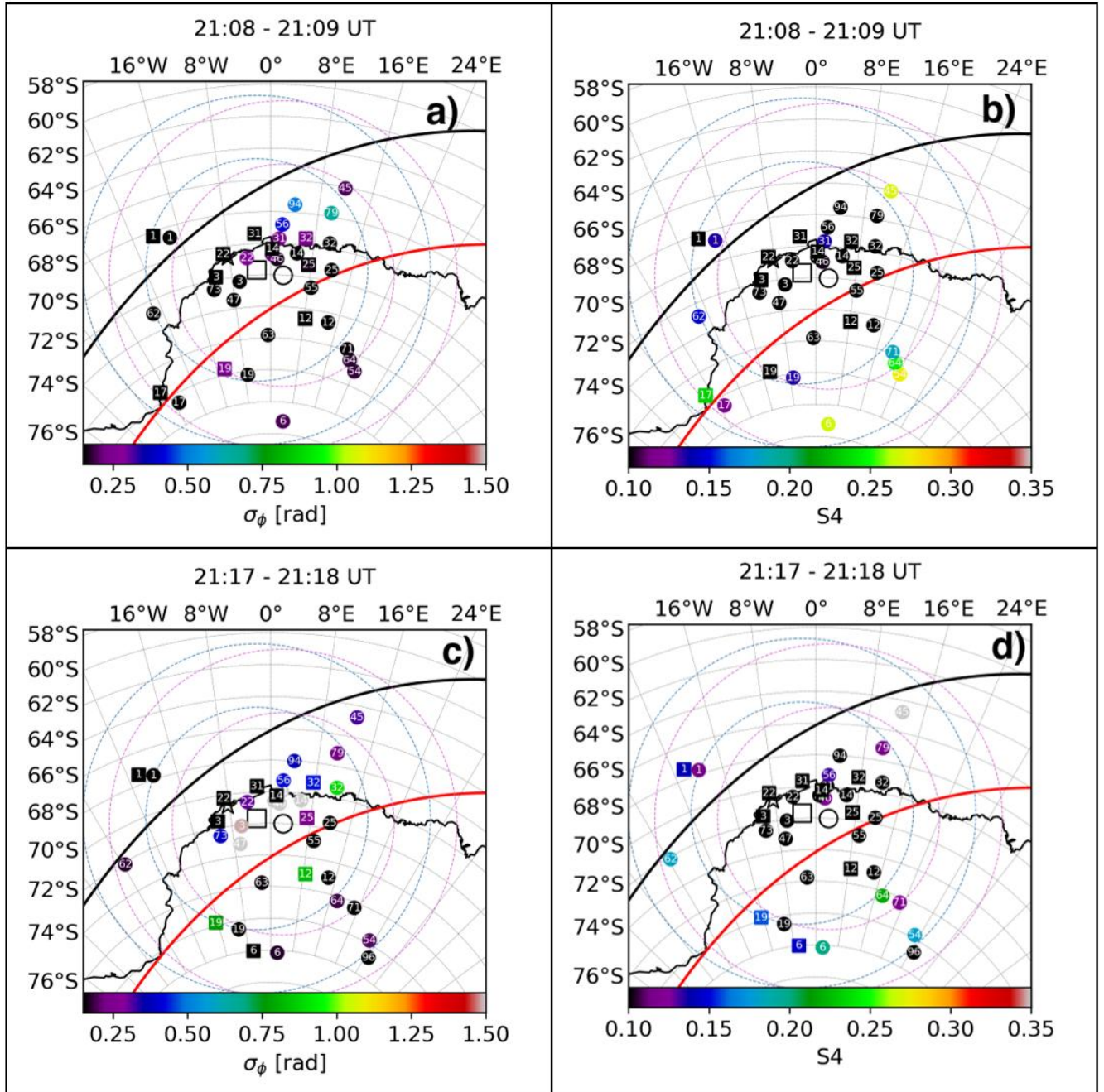


Рисунок 3.6 — Фазовые (а, с) и амплитудные (b, d) сцинтилляционные индексы в 21:08 UT и 21:17 UT 18 марта 2018 года.

В 21:17 UT, согласно данным магнитометров SANAЕ IV и Neumayer (см. Рисунок 3.3) начинается резкое увеличение северной компоненты N геомагнитного поля, и одновременно значения σ_ϕ над приемниками увеличиваются более чем на 0.8 рад (спутники PRN: 14 = 1.67 рад, 3 = 1.49 рад, 32 = 0.88 рад, 31 = 1.63 рад, 47 = 1.72 рад, 46 = 1.77 рад, 75 = 2.03 рад, 12 = 0.82 рад) (Рисунок 3.6с). В последующие несколько минут еще более полярные спутники

показывают значения $\sigma_\phi > 1$ рад. Последующее уменьшение компоненты N в 21:20 UT на обоих магнитометрах указывает на увеличение западного электроджета, связанного с увеличением электрического поля или проводимости. На поведение индекса S4 фаза роста суббури не оказывает столь сильного влияния (Рисунок 3.7b). Однако значение S4 увеличивается у спутников, проходящих через края аврорального овала. Это в целом соответствует статистическому исследованию (Spogli et al., 2009), где было показано, что индекс амплитудной сцинтилляции S4 увеличивается по мере приближения к границам аврорального овала. Так, спутник PRN 45 уже имел высокие значения σ_ϕ и S4 еще до потери синхронизации в 21:23 UT на угле возвышения $\alpha = 13.4^\circ$ (Рисунок 3.5d). Данные со спутника GPS PRN 1, полученные с помощью приемников TRL и SNA, также показывают увеличение S4 внутри ПД (α составляет около 13°) (Рисунок 3.7b). Спутник PRN 46 имел низкие значения индекса σ_ϕ , приблизительно 0.25 рад, и немного более высокий индекс S4, около 0.27, перед входом в ожидаемую зону ПД (Рисунок 3.7d).

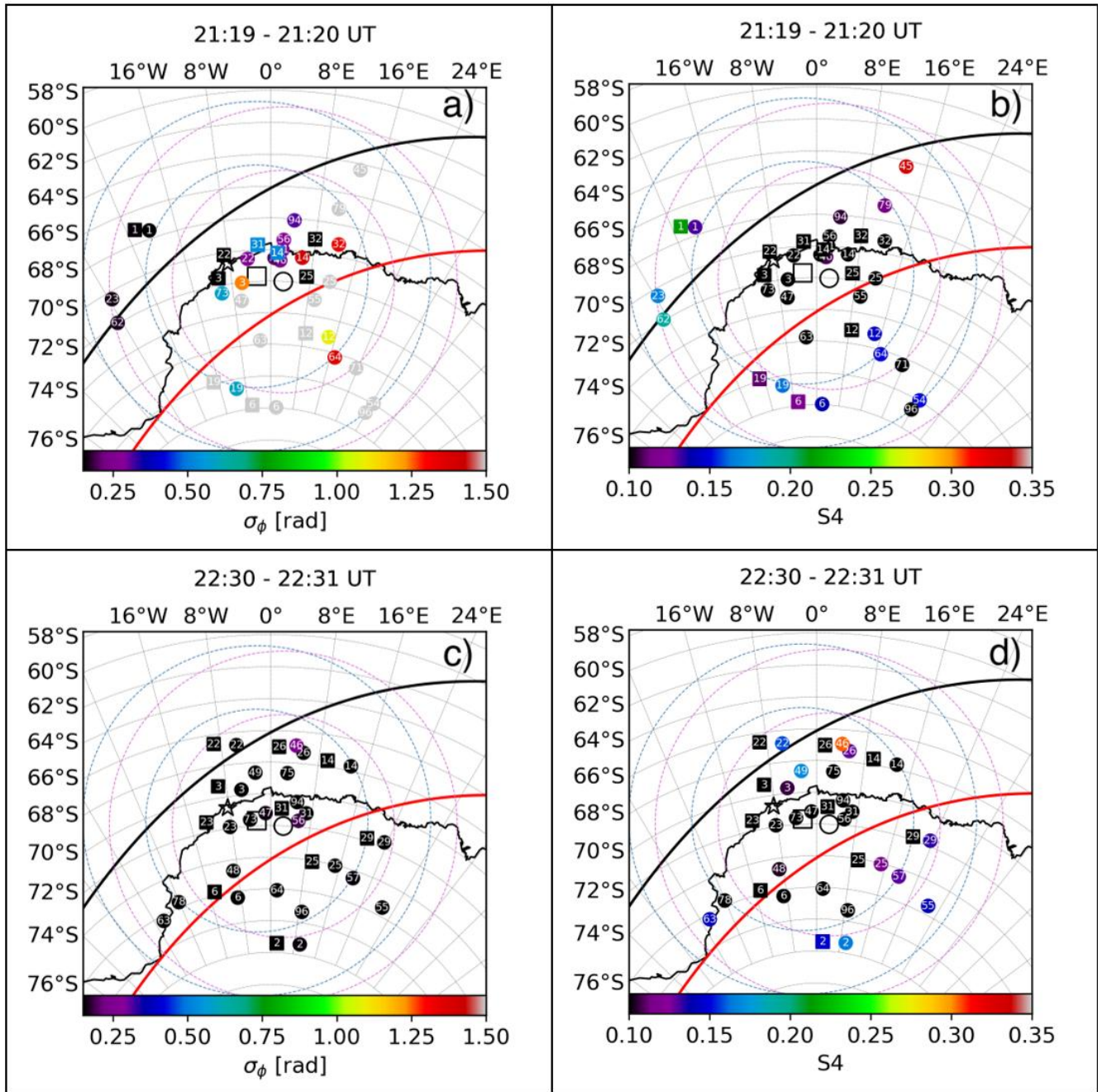


Рисунок 3.7 — Фазовые (а, с) и амплитудные (b, d) сцинтилляционные индексы в 21:19 UT и 22:30 UT 18 марта 2018 года.

Спутниковые измерения, подтверждающие наличие зоны ПД, были также получены с помощью спутника Swarm В в 22:20 UT. Затем, в зоне прохождения ПД, связь со спутником PRN 46 была потеряна через 19 минут, в 22:39 UT ($\alpha = 23.49^\circ$). Потеря захвата снова происходит в 22:46 UT ($\alpha = 19.83^\circ$), а также в период с 22:50 ($\alpha = 17.76^\circ$) по 22:54 UT ($\alpha = 15.7^\circ$). После этого, несмотря на то что минимальный угол возвышения в 10° , выбранный в анализе, еще не был достигнут, связь со спутником больше не устанавливалась. Спутник GPS PRN 14 показывает увеличение значений индексов S4 и σ_ϕ после 22:35 UT по мере приближения спутника к району, где был обнаружен ПД. После прохождения через слегка

возмущенную область в 22:59 UT произошла потеря захвата сигнала L1CA на приемнике SANAE IV ($\alpha = 12.42^\circ$). Позже ночью на спутнике Galileo PRN 73 трижды был потерян захват сигнала в 01:19, 01:23 и 01:28 UT, что соответствует участку приблизительно от -57° до -58° геомагнитной широты ($\alpha = 15.85^\circ, 14.40^\circ, 12.59^\circ$). Измерения с помощью дрейфметра, а также УФ-изображения с SSUSI на борту спутников DMSP F-17 и F-18 подтверждают все еще стабильное присутствие структуры ПД около -60° геомагнитной широты в 01:56 и 02:00 UT соответственно. Это указывает на то, что структура является долгоживущей, динамичной (с перемещениями к полюсам и экватору), а также варьируется по ширине от 1° до 3° . У всех рассмотренных спутников наблюдалось увеличение индексов фазовой и амплитудной сцинтилляции, а также потеря захвата сигнала в областях, где их сигнал проходил через ПД. Это еще раз указывает на заметное влияние ПД на сигналы ГНСС.

Рисунок 3.8 показывает, как по спутниковым данным определялось положение ПД во время рассматриваемого геомагнитного события в южном полушарии. На Рисунке 3.8a–b представлено положение ПД примерно в 20:56:30 UT на геомагнитных широтах от -58.1° до -57.5° на 18 MLT согласно данным DMSP F-18. Несмотря на пробел в данных внутри провала электронной концентрации, расположенного в пределах геомагнитных широт от -58.5° до -57.4° , заметно увеличение горизонтальной скорости дрейфа ионов на запад до 2400 м/с. Согласно Рисунку 3.8b, увеличение температуры ионов примерно в два раза по сравнению со средним уровнем пространственно не совпадает с пиком вертикальной и горизонтальной скоростей дрейфа и расположено примерно на 2° севернее по широте. Как и в случае 14 марта 2021 года, рассмотренном во второй Главе, это может быть связано со значительно более низкой пространственной частотой измерений температуры ионов и электронов (~ 0.25 Гц), чем пространственная частота измерений скорости дрейфа (1 Гц) на спутнике DMSP. Горизонтальная скорость дрейфа ионов выше 1000 м/с, совпадающая с падением концентрации электронов в субавроральной области ионосферы в вечернем и ночном секторах MLT, явно указывает на наличие ПД в рассматриваемой области геомагнитных широт. Как уже упоминалось, положение этого ПД отмечено на Рисунках 3.2 и 3.4 толстыми участками линий пролета.

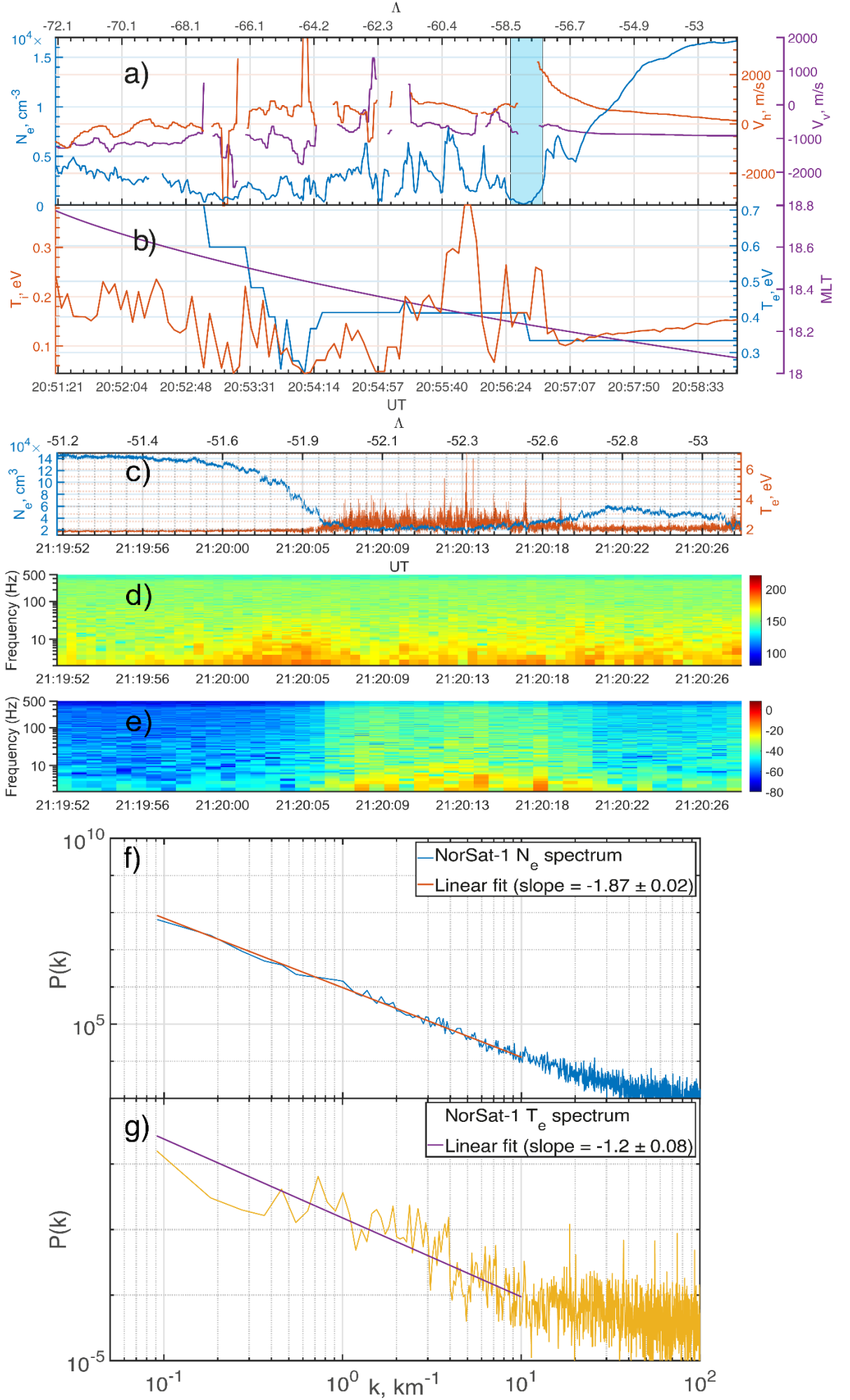


Рисунок 3.8 — Измерения со спутников DMSP F-18 и NorSat-1. (a) Динамика горизонтальной скорости дрейфа ионов (красная линия), вертикальной скорости дрейфа ионов (фиолетовая линия) и концентрации электронов (синяя линия) в зависимости от геомагнитной широты (верхняя ось абсцисс, проекция 350 км) и времени UT (нижняя ось абсцисс) согласно данным DMSP F-18 на 20 UT 18 марта 2018 года. ПД показан синей областью. (b) Динамика температуры ионов (красная линия), температуры электронов (синяя линия) и MLT (фиолетовая линия) согласно данным DMSP F-18 на 20 UT 18 марта 2018 года. (c) Динамика электронной температуры (красная линия) и электронной концентрации (синяя линия) в зависимости от геомагнитной широты (верхняя ось абсцисс, проекция 350 км) и времени UT (нижняя ось абсцисс) согласно данным NorSat-1 на 21 UT 18 марта 2018 года. (d) Спектрограмма мощности, полученная с использованием дискретного преобразования Фурье данных электронной концентрации. (e) Спектрограмма мощности, полученная с использованием дискретного преобразования Фурье данных электронной температуры. (f) Спектральная мощность электронной концентрации внутри ПД как функция пространственного волнового числа. (g) Спектральная мощность электронной температуры внутри ПД как функция пространственного волнового числа.

На Рисунке 3.8с показан ПД, обнаруженный на основе высокочастотных данных о концентрации и температуре электронов, измеренных на борту спутника NorSat-1. Как видно из рисунка, в интервале геомагнитных широт от -52.0° до -52.7° наблюдается провал концентрации электронов, пространственно совпадающий с увеличением значения температуры электронов и ее флуктуациями. Медианная концентрация электронов в указанном интервале составляет $\sim 22300 \text{ см}^{-3}$, а медианная температура электронов — $\sim 2.33 \text{ эВ}$. За пределами интервала медианная концентрация электронов составляет $\sim 137600 \text{ см}^{-3}$ и 46248 см^{-3} в направлении экватора и полюса соответственно, а медианная температура электронов — $\sim 1.85 \text{ эВ}$ и $\sim 2.04 \text{ эВ}$. Таким образом, концентрация электронов внутри провала концентрации примерно в 6 раз ниже, чем к экватору, и примерно в 2 раза ниже, чем к полюсу, в то время как температура электронов примерно в 1.26 раза выше, чем к экватору, и примерно в 1.14 раза выше, чем к полюсу. Поскольку спутник NorSat-1 не оснащен прибором для измерения скорости дрейфа ионов, невозможно напрямую определить наличие ПД в рассматриваемом временном интервале, однако хорошо известные характерные свойства ПД (увеличение температуры и уменьшение концентрации электронов) указывают на его наличие. Кроме того, благодаря данным о горизонтальной скорости дрейфа ионов DMSP F-18 известно, что ПД существовал в 20:56 UT при 18 MLT. Это означает, что ПД также развивался в 21:20 UT при 00 MLT, где NorSat-1 проводил измерения. Таким образом, рассматриваемое снижение электронной концентрации, совпадающее с повышением электронной температуры,

обнаруженное по данным NorSat-1, представляет собой ПД. Аналогично, напрашивается вывод, что ПД присутствует во время пролетов Swarm B и Swarm C, поскольку данные о концентрации и температуре электронов, полученные с помощью сферических зондов Ленгмюра на спутниках Swarm в 19:50, 20:48 и 22:20 UT, демонстрируют поведение, аналогичное данным NorSat-1 (данные со спутников Swarm на рисунках не показаны). Несмотря на то, что разрешение зондов Ленгмюра на Swarm и NorSat-1 различно (2 Гц и 1 кГц соответственно), сглаженные значения достаточно близки.

На Рисунках 3.8d и 3.8e представлены спектрограммы мощности дискретного преобразования Фурье концентрации и температуры электронов по данным NorSat-1. Спектрограмма на Рисунке 3.8d показывает, что внутри ПД присутствуют флуктуации концентрации электронов (увеличение спектральной мощности на частотах до ~ 50 Гц, что соответствует пространственному размеру плазменных неоднородностей в несколько сотен метров), но они не превышают фоновый уровень. Напротив, спектрограмма на Рисунке 3.8e иллюстрирует значительное увеличение флуктуаций электронной температуры внутри ПД относительно фонового уровня. Спектральная мощность электронной температуры возрастает на частотах до 300–400 Гц, что соответствует пространственному размеру плазменных неоднородностей в несколько десятков метров. Это подтверждает один из выводов второй Главы данной диссертационной работы о том, что неоднородности электронной температуры внутри ПД более выражены, чем неоднородности электронной концентрации.

Спектр электронной концентрации по измерениям NorSat-1, показанный на Рисунке 3.8f, также демонстрирует наличие плазменных неоднородностей внутри ПД размерами в сотни метров. Наклон спектра электронной концентрации до $k = 10 \text{ км}^{-1}$ составляет -1.87 ± 0.02 , что попадает в диапазон $-1.8 \geq p_n \geq -1.94$, полученный в первой Главе диссертационной работы, а также соответствует диапазону $-5/3 \geq p_n \geq -2$ из (Mishin, Blaunstein, 2008). Следует отметить, что он отличается от наклона -1.5 , который наблюдается в низкоширотных ионосферных возмущениях, измеренных DMSP F-10 (Foster, Rich, 1998). Спектр электронной температуры, показанный на Рисунке 3.8g, значительно отличается от спектра электронной концентрации. Наклон температурного спектра до $k = 10 \text{ км}^{-1}$ составляет -1.2 ± 0.08 , что меньше, чем у спектра концентрации. Это говорит о том, что мелкомасштабные флуктуации температуры выражены сильнее, чем флуктуации концентрации. Таким образом, можно заключить, что ПД включает в себя флуктуации и плазменные неоднородности различных масштабов, которые объясняют повышение сцинтилляционных индексов и потерь сигналов ГНСС, что существенно влияет на радиосвязь, распространение радиоволн и точность позиционирования.

«Маска отсечки по углу места» для спутника ГНСС является важным параметром для изучения ионосферы. Приемник начинает отслеживать радиосигнал спутника после того, как

спутник поднимается над горизонтом под определенным углом. Обычно значение маски отсечки по углу места устанавливается в диапазоне от 10° до 30° для исследований ионосферы. Преимущества использования меньших углов места заключаются в следующем: меньший угол отсечки обеспечивает лучшее пространственное покрытие данных, что важно, поскольку в данной Главе рассмотрен Антарктический регион, где спутники ГНСС видны только под определенным углом из-за малого наклона орбит спутников ГНСС; даже при углах места больше 30° многолучевые эффекты (из-за распространения сигнала по нескольким путям вследствие рассеяния и отражений в среде с неоднородностями) могут приводить к фазовым сдвигам и искажениям псевдодальности из-за помех сигнала (Chernyshov et al., 2020a; Захаров и др., 2020). Поэтому в данном исследовании выбран угол отсечки 10° . Антарктический регион — менее шумная зона (отсутствие зданий, деревьев и так далее), что позволяет рассматривать более низкие пороговые углы возвышения.

Следует проверить, не является ли рассматриваемый случай, возможно, лишь единичным событием. Согласно данным спутников DMSP, ПД также присутствовал в дни, близкие к выбранному событию. Один из случаев, произошедший 25 марта, показан на Рисунке 3.9. Это геомагнитное возмущение было слабее, а экваториальная граница диффузного полярного сияния располагалась над приемниками. Толстые участки вдоль траектории полета спутника показывают, насколько динамична структура ПД во времени. Разница в 10 минут между двумя пролетами приводит к смещению ПД к полюсу примерно на 1° геомагнитной широты. Смещение к полюсу связано с общей динамикой смещения границ полярного овала при снижении геомагнитной активности (Zossi et al., 2020). Однако на экваториальной границе области авроральных высыпаний по SSUSI, где начинается узкая область ПД, наблюдается существенное увеличение индексов фазовой и амплитудной сцинтилляции.

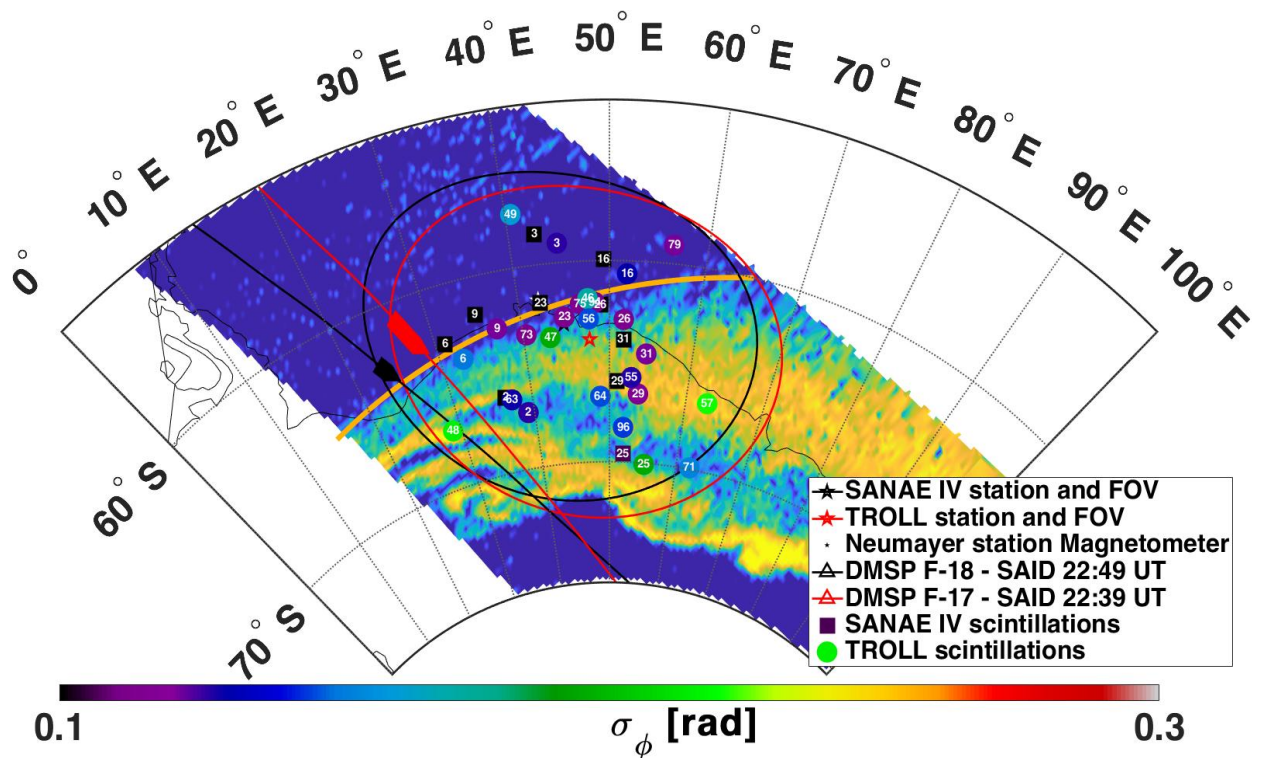


Рисунок 3.9 — Как на Рисунке 3.4, но для 25 марта 2018 года в 22:50 UT. Спутники DMSP пролетели над южным полушарием в 22:39 (F-17) и в 22:49 (F-18). Следует отметить, что во время этого события не было близких пролетов спутников NorSat-1 и Swarm, а также имелись пробелы в их данных.

Наблюдается потеря захвата сигнала некоторых спутников, зафиксированная приемником Troll: PRN 3 в 23:04 UT ($\alpha = 15.13^\circ$, -57.7° геомагнитной широты), PRN 55 с 19:44 до 19:55 UT ($\alpha = 19.77^\circ$ и 25.6° , -59.6° и -60.4° геомагнитной широты), PRN 46 в 23:29 UT ($\alpha = 25.84^\circ$, -60.0° геомагнитной широты), после чего приемник прекращает захват спутника PRN 58 в 23:42 UT ($\alpha = 11.3^\circ$, -63.8° геомагнитной широты). Эти спутники характеризуются большим углом возвышения во время потери сигнала, чем рассматриваемое событие 18 марта. Это соответствует положению ПД, которое 25 марта сместилось ближе к полюсу, чем 18 марта. Таким образом, можно сделать вывод, что увеличение индексов сцинтилляции во время развития ПД в ходе геомагнитного события 18 марта 2018 года не является «изолированным» событием, а представляет собой регулярное явление в высокоширотном регионе.

В рассматриваемом примере геомагнитного события влияние ПД на прохождение радиоволн проявляется в увеличении значений обоих индексов сцинтилляции (но без значительного увеличения значений S4). Однако необходимо учитывать геометрию рассматриваемого случая. Поскольку рассмотрен Антарктический регион, навигационный сигнал поступает на приемник под меньшим углом возвышения по сравнению со средними широтами, так как наклон спутников ГНСС относительно невелик. Поэтому следует более подробно рассмотреть три случая сигнала на пути спутник-приемник. Первый случай касается

спутника с малым углом возвышения (спутник в левом нижнем углу на Рисунке 3.10). Сигнал проходит как через область ПД, так и через область диффузного полярного сияния, что означает, что обе эти области будут влиять на принимаемый сигнал на земле. ИРР расположена несколько выше по широтным координатам, чем проекция ПД. Такие случаи видны на Рисунках 3.4 и 3.9, когда ИРР демонстрирует значительные значения индексов сцинтилляции экваториальнее границ ПД. Наиболее интересный случай — со спутником с большим углом возвышения, сигнал которого также проходит через эти две области. Из-за выбранного приближения тонкого ионосферного слоя и геометрии линий магнитного поля ИРР на высоте 350 км расположена близко к границе диффузного полярного сияния, что создает на Рисунках 3.4 и 3.9 впечатление учета влияния только правой части пути сигнала, проходящей через зеленую область диффузного полярного сияния. Однако отчетливо видно, что соизмеримый путь сигнала проходит через область ПД, которая расположена преимущественно в F-области ионосферы и измеряется низкоорбитальными спутниками на высотах более 450 км. Примеры таких спутников видны на границах высыпаний на Рисунках 3.4 и 3.9. Следовательно, радиосигнал от «экваториальных» спутников (как показано на Рисунке 3.10) проходит не только через область ПД с ее проявлением в ионосферной F-области, но и через область диффузных полярных сияний. Последний спутник (справа) показывает, что сигнал проходит преимущественно через дискретную область полярных сияний. Соответственно, в таком случае нет трудностей в определении основных источников, влияющих на сигнал. Для полярно-орбитальных спутников авроральная станция может наблюдать усиленные сцинтилляции от неоднородностей, расположенных вдоль силовых линий поля, когда траектория луча проходит вдоль локального магнитного поля. Однако это влияние не является существенным для ГНСС на авроральных широтах (Forte, Radicella, 2004; van der Meeren et al., 2014).

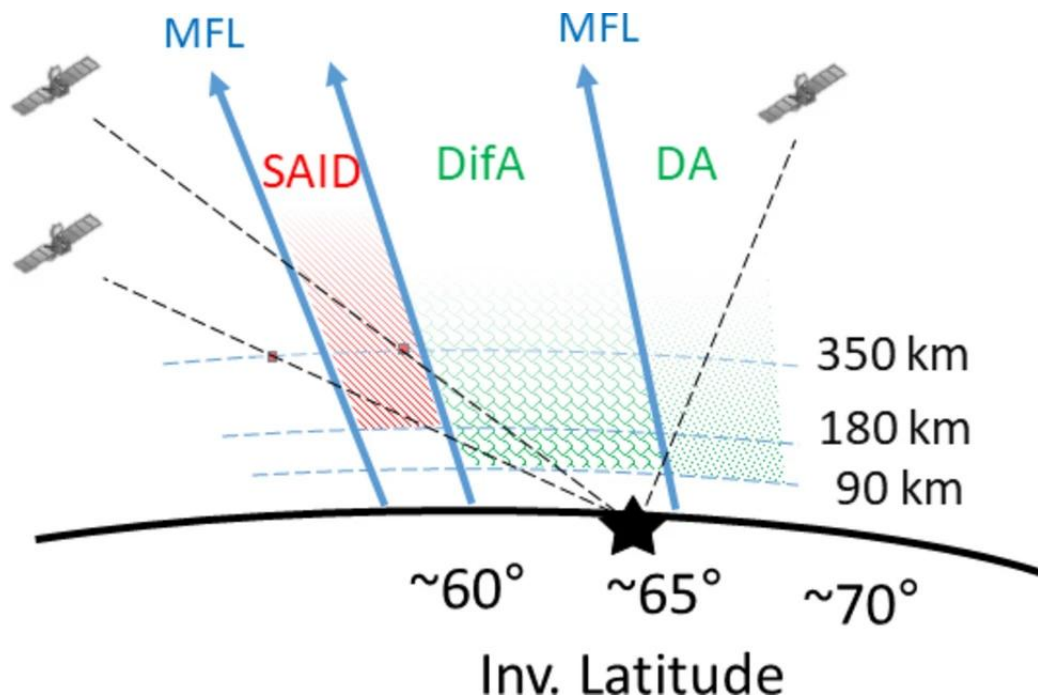


Рисунок 3.10 — Схематическое представление геометрии прохождения навигационного сигнала спутника ГНСС в субавроральной области в координатах высота-MLAT. Траектория прохождения сигнала показана черной пунктирной линией, местоположение наземного приемника GISTM — черной звездочкой. Горизонтальные синие пунктирные линии отображают границы ионосферных слоев E и F на высотах 90, 180 и 350 км. Красная область обозначает узкую полосу ПД, а зеленая область показывает авроральную зону высыпаний частиц (сплошная зеленая линия — диффузное полярное сияние (DifA), штриховая зеленая — дискретное полярное сияние (DA)). Синие стрелки иллюстрируют направление линий магнитного поля Земли (MFL) в субавроральной области в Антарктиде. Красные квадраты на луче спутник-приемник представляют собой IPP на высоте 350 км.

Поэтому довольно сложно отделить один эффект от другого. Результаты, представленные в текущей Главе, показывают, что это комбинация двух эффектов, обусловленных границей ПД и границей диффузного полярного сияния. Следует отметить, что сигналы спутников, проходящие только через области диффузного полярного сияния, а также через границу между диффузным и дискретным полярным сиянием, не были подвергнуты сильным сцинтилляциям, и в этих сигналах не наблюдалось потери захвата спутников ГНСС. В будущем необходима большая сеть приемников для определения связи сцинтилляции с субавроральными структурами плотности плазмы.

3.3 Ионозондовые измерения

Ионозонды, особенно ионосферные цепочки, могут быть одним из инструментов для изучения ПД среди наземных измерительных средств. Исследованию ПД с помощью ионозондов и ионосферных цепочек посвящено множество работ (Филиппов и др., 1985; Galperin et al., 1986; Филиппов и др., 1989; Гальперин и др., 1990; Khalipov et al., 2003; Stepanov, 2019a, 2019b, 2023). Значительная работа в этом направлении проделана по данным ионозондов вертикального зондирования (ВЗ) и возвратно-наклонного зондирования (ВНЗ) Якутской меридиональной цепочки (Степанов и др., 2017). Были рассмотрены ионограммы станции ВЗ в момент нахождения ПД вертикально над станцией на ионограммах помимо снижения критической частоты слоя F2 (f_oF2) в ГИП более чем на 1 МГц в час (Халипов и др., 1977) начинает регистрироваться дополнительный след F-слоя с меньшей критической частотой и большей высотой. Такие следы в работах (Сивцева и др., 1983; Филиппов и др., 1984) были определены как F3s-отражения, указывающие на появление одновременно двух различных профилей вблизи зенита станции — обычного и резко разреженного на большей дальности. Имеются две возможности интерпретации таких ионограмм: наличие или узкого глубокого минимума концентрации, или резкой стенки ионизации с перепадом ее на порядок или более по концентрации. На ионограммах, представленных в монографии (Степанов и др., 2017) наблюдаются отражения от нескольких структур субавроральной ионосферы: F3s-отражение — ионосферный признак («автограф») ПД, наклонные F2s-отражения, надежно идентифицируемые как отражения от полярной стенки ГИП, и, наконец, отражения от фонового слоя ионизации. Плотность плазмы в полосе ПД, измеренная на высоте 630 км спутником «Космос-184» в момент снятия ионограммы, снизилась на небольшое значение, в то время как по наземным ионограммам в области высот максимума области F фиксируется более глубокий и узкий провал ионизации. Удалось также предварительно оценить характерное время формирования провала в концентрации электронов в полосе ПД на высотах максимума F-слоя и ниже — 15–30 мин (Филиппов и др., 1984; Galperin et al., 1987; Решетников и др., 1987), который в условиях медленной рекомбинации и отсутствия ионизации в ГИП может сохраняться долго даже после того как ПД перестал действовать. В работе (Сивцева и др., 1983) помимо F3s-отражений определены такие «автографы» ПД на ионограммах как появление «лакун F» — пропадания частей следа на определенных частотах, а также повышение диффузности следов, что свидетельствует о возникновении мелкомасштабных неоднородностей. Авторы (Степанов и др., 2017) демонстрируют ионограммы ВЗ в полосе ПД, измеренные ионозондами DPS-4 (Digital Portable Sounder), которые позволяют определить направление прихода отраженного следа. Среди F3s-отражений присутствовал U-образный след

(Рисунок 3.11), пришедший с севера (синий цвет на ионограмме), позволяющий предположить, что провал электронной концентрации вытянут по долготе и имеет форму «траншеи». В статье (Филиппов и др., 1984) представлены результаты расчетов траекторий радиоволн в рамках приближения лучевой оптики при вертикальном зондировании ПД над станцией. Расчеты подтверждают появление на «синтетических» ионограммах F3s-отражений, а также «раздвоение» основного следа F-слоя, вызванное отражением от двух стенок провала электронной концентрации в полосе ПД.

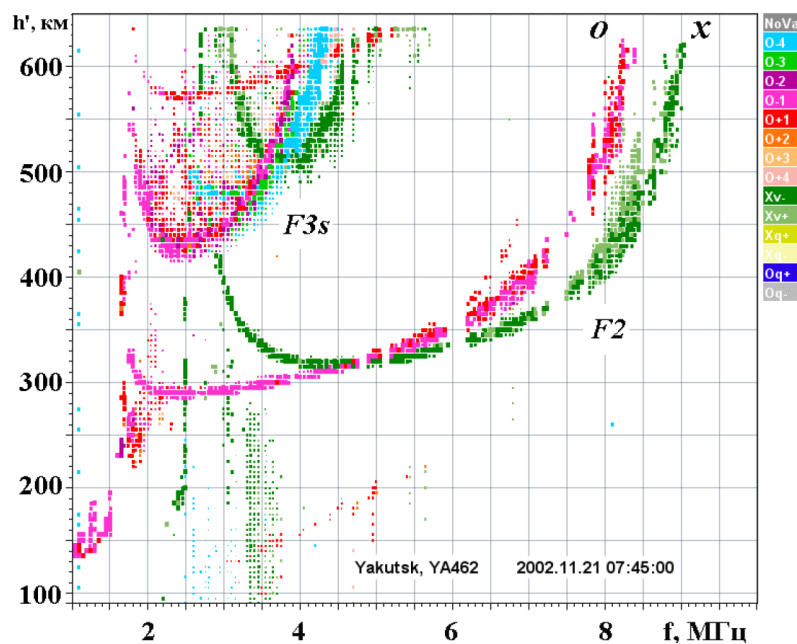


Рисунок 3.11 — Дополнительный характерный след отражения (F3s), зарегистрированный на ст. Якутск 21 ноября 2002 года в 16:45 местного времени в момент формирования ПД над ионосферной станцией (Степанов и др., 2017).

С использованием измерений Якутской меридиональной цепочки получен ряд интересных результатов как, например, длительность ПД и зависимость частоты возникновения ПД от фазы суббури и MLT (Khalipov et al., 2001; Stepanov et al., 2023), расположение ПД относительно границы высыпаний авроральных электронов и сдвиг по широте к экватору с увеличением геомагнитной активности (Решетников и др., 1987; Гальперин и др., 1990; Филиппов, 1996). Кроме того, вертикальный дрейф ионов внутри ПД был обнаружен с использованием совместных измерений Якутской меридиональной цепочки и спутников DMSP (Khalipov et al., 2016).

Таким образом, присутствие ПД вертикально над ионосферной станцией проявляет себя на ионограммах рядом признаков («автографов»):

- резкое снижение критической частоты слоя F2 (>1 МГц/ч);
- повышение высоты F-слоя, связанное с вертикальным движением плазмы;

- появление дополнительных следов F3s на большей высоте и меньшей частоте, чем след основного F-слоя;
- появление среди F3s-отражений U-образного следа с северного (полярного) направления;
- появление второго следа F-слоя рядом с основным, что вызывается отражением от двух стенок провала электронной концентрации;
- «лакуны F» — пропадание частей следа на определенных частотах;
- повышение диффузности следов (F-рассеяние), связанное с мелкомасштабными неоднородностями параметров плазмы.

Как было сказано выше, многие ионосферные процессы, включая ПД, происходят одновременно в обоих полушариях. Поскольку в Антарктиде (и в южном полушарии в целом) нет такой плотной сети ионозондов, как в северном полушарии, в текущем разделе были проанализированы ионограммы субавроральных ионосферных станций в Восточной и Центральной Европе в полосе ПД во время того же геомагнитного события — 18 марта 2018 года и в том же временном диапазоне (21–23 UT), что был рассмотрен в предыдущем разделе по данным сцинтилляционных приемников ГНСС. В текущем разделе использованы ионограммы, полученные ионозондами в Троицке, Москва (ионозонд DPS-4, 55.5° с.ш., 37.3° в.д.), Ладушкине, Калининградская область (ионозонд Парус-А, 54.5° с.ш., 20.2° в.д.) и в Юлиусрух — точке, расположенной практически на той же широте в северной Германии (ионозонд DPS-4, 54.6° с.ш., 13.4° в.д.), 18 марта 2018 года. Радиозондирование ионосферы с использованием ионозондов Парус-А и DPS-4 проводится в патрульном режиме каждые 15 минут.

Ионозонд Парус-А был разработан в 2010 году в ИЗМИРАН (Гивишвили и др., 2015) и предназначен для диагностики состояния ионосферы в автоматическом и ручном режимах методом вертикального зондирования в соответствии с требованиями WMO (World Meteorological Organization), URSI (International Union of Radio Science) и Росгидромета. Он построен по классической схеме импульсного локатора, использующего простой радиоимпульс переменной частоты в диапазоне 1–20 МГц. Используя входящую в состав ионозонда систему синхронизации на основе GPS/ГЛОНАСС, возможны дополнительные режимы работы, в частности, реализация методов прямого транзионосферного (ТИЗ) и обратного транзионосферного (ОТИЗ) зондирования. Опыт эксплуатации ионосферной сети из десяти ионозондов Парус-А продемонстрировал исключительную стабильность работы и измерений ионосферы методом вертикального зондирования даже в условиях возмущений — ионосферных бурь, F-рассеяния, косых отражений, волн широкого спектра и так далее. Пример ионограммы, построенной ионозондом Парус-А представлен на Рисунке 3.12.

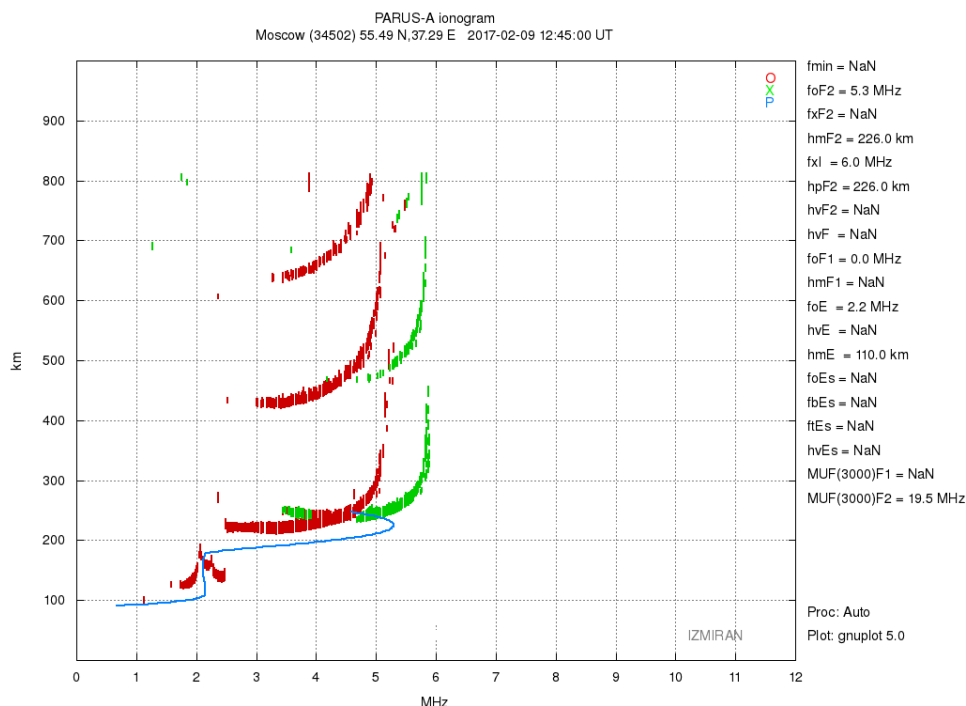


Рисунок 3.12 — Пример ионограммы, построенной ионозондом Парус-А в Троицке (Москва).

В России действуют пять ионозондов DPS-4, которые установлены в Иркутске, Норильске, Якутске, Жиганске (Якутия) и Москве (Троицке). Система DPS-4 использует радиолокационный метод, аналогичный цифровому метеорологическому радару, для определения скорости и направления движения неоднородностей в ионосфере. Первый этап включает создание «карт неба» (SkyMaps), отображающих измерения углов прихода и доплеровских сдвигов частоты для отдельных, частично рассеянных радиоволн «одинокими неоднородностями». Эти карты неба предоставляют оценки распределения мощности на основе углов прихода рассеянных радиоволн. Пример карты неба показан на Рисунке 3.13. При построении карт неба излучение испускается на четырех частотах, автоматически выбираемых на основе последней ионограммы. Весь диапазон расстояний (высот на ионограмме) в системе DPS-4 разделен на интервалы по 5 км. В каждой из этих ячеек диапазона накапливается массив амплитуд (точнее, квадратурных компонент сигнала) в течение приблизительно 50 с. Затем этот массив подвергается преобразованию Фурье для каждой ячейки диапазона. Преобразование Фурье дает комплексный спектр сигнала для каждого интервала расстояния, в результате чего получается матрица, в которой непустыми являются только расстояния до источника сигналов и ячейки, в которых сконцентрирован спектр отраженного (рассеянного) сигнала.

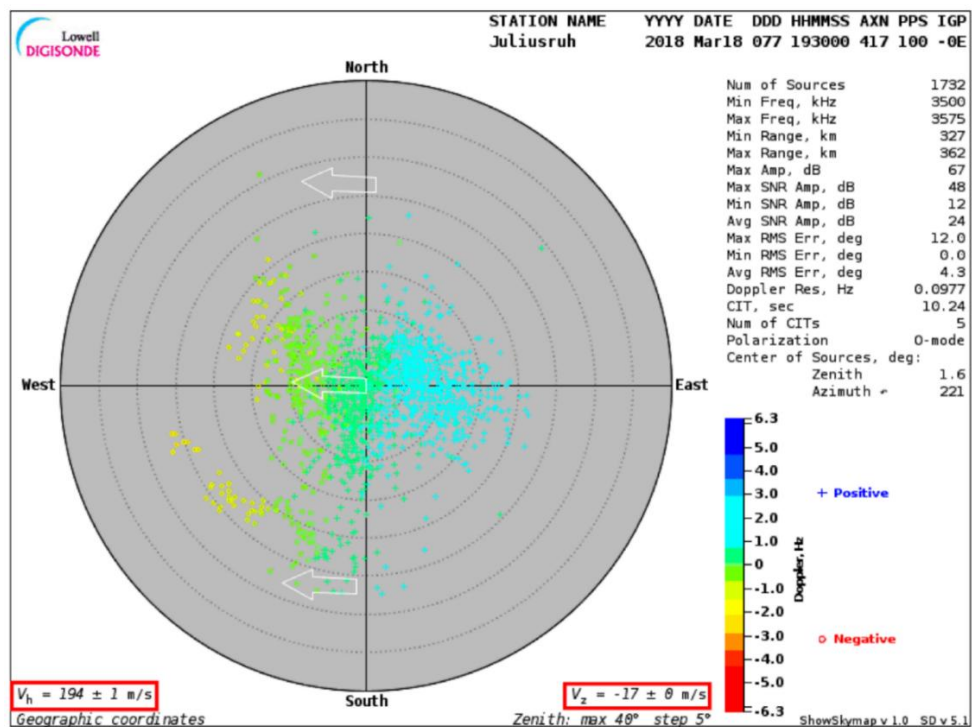


Рисунок 3.13 — Пример SkyMap — «карты неба», создаваемой ионозондом DPS-4. Красными рамками отмечены горизонтальная (V_h) и вертикальная (V_z) компоненты скорости дрейфа ионосферных неоднородностей, рассчитанные по данным SkyMap. Направление дрейфа показано серыми стрелками.

Система DPS-4 имеет четыре приемных канала и четыре антенны, расположенные на земле на некотором расстоянии друг от друга (McNamara, 2006). Описанная выше обработка выполняется для каждой из четырех приемных антенн. Поскольку полученные спектры являются комплексными и содержат информацию как об амплитуде, так и о фазе, можно определить разность фаз сигналов, принимаемых четырьмя расположенными на некотором расстоянии антеннами, для каждой ячейки расстояния и доплеровской частоты. Это позволяет рассчитать углы прихода принимаемых сигналов DPS-4 с помощью процедуры, известной как «определение фазового направления». Обработываются только непустые ячейки расстояния и доплеровской частоты с отношением сигнал/шум, превышающим пороговое значение. Результат этой обработки показан на Рисунке 3.13. Здесь углы прихода представлены положением точек в полярной системе координат, а доплеровские сдвиги частоты обозначены цветом точек. Сдвиг, равный нулю, приблизительно обозначен сине-зеленым цветом, отрицательные сдвиги в левой половине рисунка — желто-зеленым, а сигналы с положительными сдвигами в правой половине рисунка — синим. Из Рисунка 3.13 видно, что отражения в правой половине изображения приближаются, а отражения в левой половине удаляются. Это также подтверждается расчетами, выполненными с помощью программы, встроенной в DPS-4, как показано серыми стрелками.

Метод построения V_h и V_z по изображениям SkyMaps основан на том факте, что для трех или более совместно движущихся отражающих объектов все три компоненты совместной скорости дрейфа однозначно определяются на основе измеренных углов прихода отраженных радиоволн и их доплеровских частотных сдвигов. При наличии сотен отраженных сигналов, рассеянных от неоднородностей, можно построить множество частичных измерений скорости, анализируя все возможные тройки. Это позволяет рассчитать среднюю скорость и среднеквадратичную ошибку измерения по всему облаку рассеянных отражений. На Рисунке 3.11 эти скорости выделены красными рамками. Более подробная информация о методах расчета V_h и V_z приведена в работе (Panchenko et al., 2019). Эти расчеты выполняются в реальном времени с помощью программного обеспечения (Reinisch et al., 1997).

Для исследования параметров ПД с помощью ионозондов помимо самих ионограмм желательно иметь дополнительные наземные и спутниковые измерительные средства (мультиинструментальный подход). В данной работе, прежде чем приступить к анализу ионограмм, мы решили убедиться, что ПД в рассматриваемый момент времени располагается над соответствующей ионосферной станцией. Для этого использованы измерения ионосферных спутников DMSP, Swarm и NorSat-1. Расположение пролетов спутников относительно друг друга и наземных ионосферных станций приведено на нижней панели Рисунка 3.14.

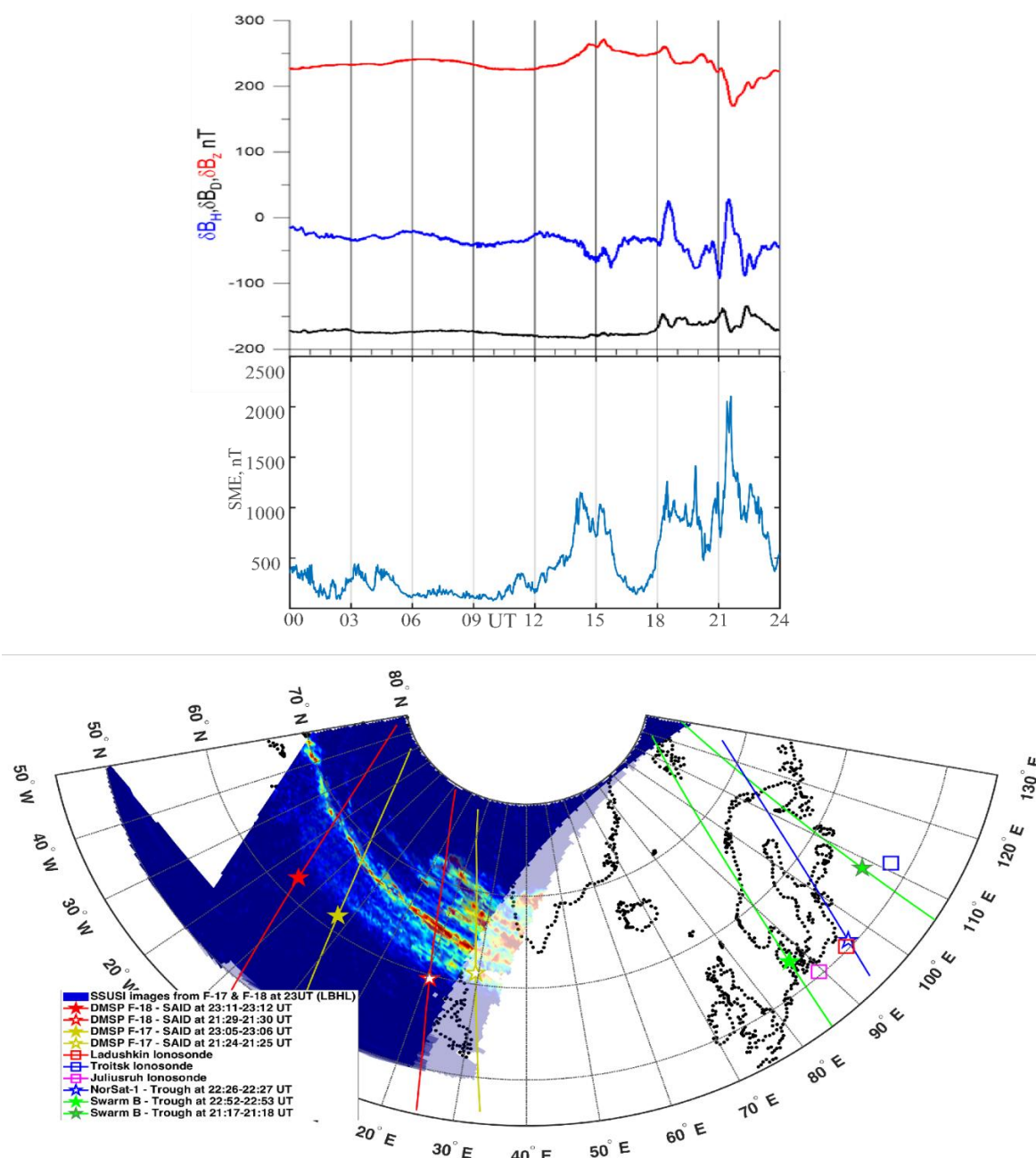


Рисунок 3.14 — Верхняя панель — Вариации компонент магнитного поля по данным магнитометра в Ладушкине (Калининград) 18 марта 2018 года. Средняя панель — Индекс SME 18 марта 2018 года. Нижняя панель — Траектории пролета спутников, места расположения ПД и провалов электронной концентрации, совпадающих с повышением электронной температуры (связанным с ПД), координаты станций ионозондов, а также УФ-снимки (LBHL) полярных сияний, полученные с помощью прибора SSUSI на спутниках DMSP F-17 и F-18 в координатах AACGM в 21–23 UT 18 марта 2018 года.

Параметры геомагнитного события 18 марта 2018 года уже были рассмотрены ранее в диссертационной работе, в области Земли Королевы Мод в Антарктиде. Тем не менее, поскольку в текущем разделе рассматривается конкретно область субавроральных широт в Европе, необходимо также привести данные о геомагнитной обстановке на этих широтах и

долготах. Верхняя и средняя панели Рисунка 3.14 иллюстрируют уровень геомагнитной активности 18 марта 2018 года, показывая вариации значений компонент магнитного поля по измерениям магнетометра в обсерватории Ладушкин в Калининградской области и геомагнитного индекса SME соответственно во время геомагнитного возмущения. В 18:00 UT и 21:00 UT, как и по данным магнетометра в Антарктиде, наблюдаются два резких пика δB_H , характерных для событий ПД (Степанов и др., 2017). Это указывает на наибольшую вероятность обнаружения ПД в это время. Индекс SME демонстрирует аналогичное поведение. В период с 18:00 до 21:00 UT индекс SME составляет около 1000 нТл с некоторыми колебаниями. После 21:00 UT индекс SME достигает пика примерно в 2000 нТл, а после 23:00 UT постепенно снижается до значения 500 нТл.

На нижней панели Рисунка 3.14 показаны положения ПД (обозначены звездочками), ионосферных станций и границ авроральных высыпаний по измерениям SSUSI на спутниках DMSP F-17 и F-18. Следует напомнить, что, поскольку спутники NorSat-1 и Swarm не оснащены дрейфметром, ПД в 00 MLT, как и во время других рассматриваемых в этой работе событий, изучается с использованием концентрации и температуры электронов, измеренных зондами Ленгмюра, по известным характерным свойствам ПД. Таким образом, звездочки на рисунке отмечают точки с наибольшей скоростью дрейфа ионов для DMSP и середину минимума концентрации электронов для NorSat-1 и Swarm. Два наложенных друг на друга УФ-изображения (LBHL), полученные с помощью SSUSI на борту DMSP F-17 и F-18, указывают на то, что экваториальная граница полярного сияния расположена на геомагнитных широтах 60°–65° в 18 MLT. Согласно данным DMSP F-18 и F-17, ПД в 18 MLT расположен на геомагнитных широтах 60°–64° в 23 UT и на 59°–63° в 21 UT соответственно, что немного экваториальнее, чем экваториальная граница аврорального овала. Расположение ПД рядом с внешним краем ионосферной проекции плазмопаузы, которая находится вблизи экваториальной границы аврорального овала типично для ПД (Maynard et al., 1980). В 00–01 MLT данные со спутников NorSat-1 и Swarm В показывают, что ПД расположен в диапазоне 50°–55° геомагнитной широты. Близость спутниковых пролетов к ионосферным станциям в Ладушкине, Юлиусрухе и Троицке дает возможность изучать ПД, используя одновременные как спутниковые, так и наземные данные, включающие в себя как горизонтальную скорость дрейфа ионов, так и концентрацию электронов.

На Рисунке 3.15 местоположения ПД, полученные из данных измерений со спутников DMSP F-17, F-18, NorSat-1 и Swarm В, отображены в координатах AACGM. ПД, зарегистрированные в одно и то же время, но на разных MLT, выделены одним цветом. Несмотря на относительно стабильную геомагнитную активность с 18 до 23 UT (за исключением пика в 2000 нТл, значение SME колеблется около 1000 нТл), ПД постепенно

смещается к экватору с течением времени, за исключением в 18 MLT в 22–23 UT, где ПД возвращается к полюсу примерно на 1° . Таким образом, в секторе 18 MLT она сдвигается с $\sim 65^\circ$ до $\sim 61^\circ$ геомагнитной широты, с минимумом около 19–21 UT. В секторе 00 MLT это смещение к экватору становится более выраженным, геомагнитные широты варьируются от $\sim 59^\circ$ до $\sim 51^\circ$. Примечательно, что в 00 MLT ПД постоянно сдвигается к экватору с 18 до 23 UT, тогда как в 18 MLT, как упомянуто выше, его геомагнитная широта уменьшается с $\sim 65^\circ$ до $\sim 59^\circ$ между 18 и 21 UT, а затем возвращается к полюсу $\sim 61^\circ$ в 22–23 UT. Следовательно, скорость уменьшения геомагнитной широты ПД относительно UT остается неизменно высокой (за исключением 18 MLT в 22–23 UT), составляя $1.5^\circ\text{--}2^\circ$ в час в 00 MLT и $0.5^\circ\text{--}1^\circ$ в час в 18 MLT. Кроме того, случаи обнаружения ПД в 00 MLT обычно происходят ближе к экватору, чем в 18 MLT.

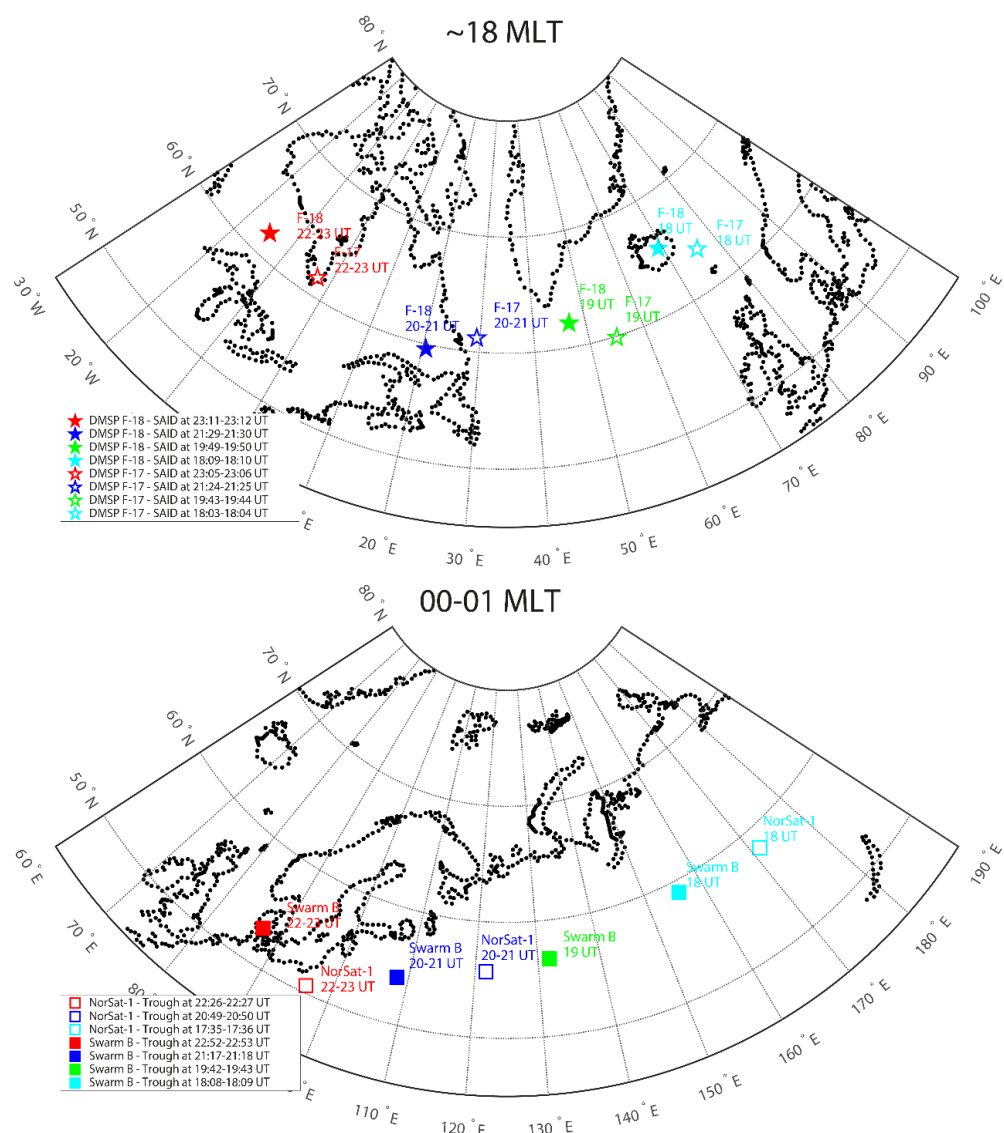


Рисунок 3.15 — Распределение ПД, обнаруженных с использованием данных с разных спутников в разное время (UT) и на разных широтах и долготах в координатах AACGM. Верхняя панель — координаты ПД (точки с наибольшей скоростью горизонтального дрейфа ионов), обнаруженные с использованием измерений дрейфметра со спутников DMSP в секторе

18 MLT. Нижняя панель — координаты средин провала электронной концентрации, совпадающего с повышением электронной температуры (связанным с ПД), обнаруженные с использованием измерений зонда Ленгмюра со спутников NorSat-1 и Swarm в 00–01 MLT.

Скорость уменьшения геомагнитной широты относительно MLT в рассматриваемом случае составляет приблизительно 0.8° – 1.5° за 1 час MLT. Как сообщалось в первой и второй Главах, согласно предыдущим исследованиям ПД средние скорости уменьшения широты составляет приблизительно 0.55° за 1 час MLT на основе спутниковых данных и около 0.7° за 1 час MLT на основе радиолокационных данных для SAPS. В данном случае средняя скорость уменьшения широты с увеличением MLT, по-видимому, выше, чем в тех предыдущих работах (Karlsson et al., 1998; Foster, Vo, 2002). Это расхождение может быть связано с постоянно высокой геомагнитной активностью, наблюдавшейся в течение нескольких часов с 18 до 23 UT 18 марта 2018 года (см. Рисунок 3.14).

На верхней и нижней панелях Рисунка 3.16 показаны параметры плазмы, измеренные спутниками DMSP F-18 и NorSat-1 в 22–23 UT для 00 и 18 MLT соответственно. Как видно на верхней панели Рисунка 3.16, согласно данным DMSP F-18, на геомагнитных широтах 60° – 64° , в 18 MLT и около 23:12 UT наблюдается увеличение горизонтальной скорости дрейфа ионов до 600–700 м/с. На тех же широтах также наблюдается падение электронной концентрации, значения которой уменьшаются в 2–3 раза. Прямые и косвенные признаки ПД, неоднократно рассмотренные ранее в работе, указывают на присутствие ПД в рассматриваемом интервале широт. Необходимо отметить, что, согласно (Khalipov et al., 2016b), вертикальная скорость дрейфа ионов внутри ПД обычно увеличивается до 50–150 м/с, а затем меняет направление с восходящего на нисходящее на полярной границе ГИП. Однако на верхней панели Рисунка 3.16 показано, что в рассматриваемом случае вертикальная скорость дрейфа ионов внутри ПД, как и 20 апреля 2018 года (Рисунок 2.4), постоянно направлена вниз (до 300–350 м/с) без изменения направления.

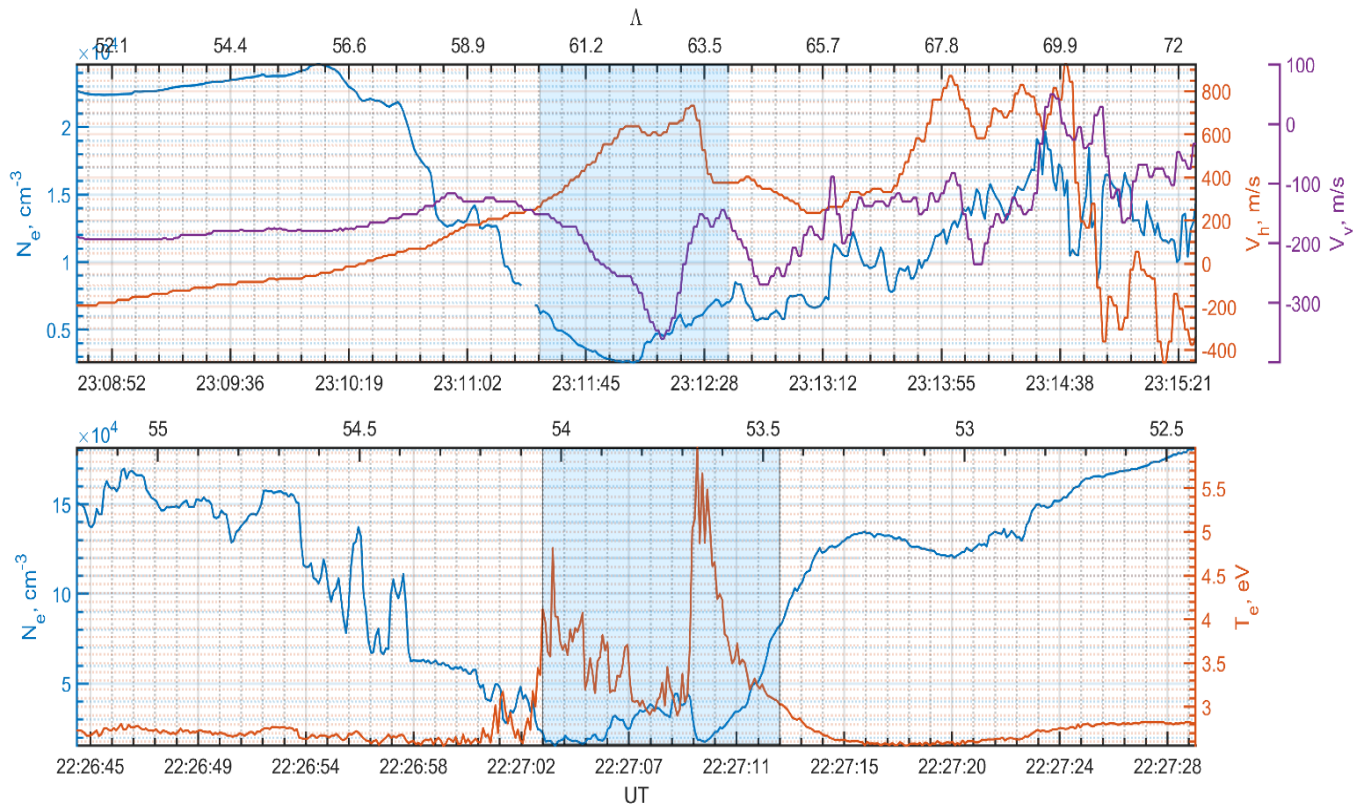


Рисунок 3.16 — (а) Динамика концентрации электронов (синяя линия), горизонтальной скорости дрейфа ионов (красная линия) и вертикальной скорости дрейфа ионов (фиолетовая линия) в $\sim 23:12$ UT и 18 MLT, измеренная спутником DMSP F-18 в координатах AACGM. (б) Динамика концентрации электронов (синяя линия) и температуры электронов (красная линия) в $\sim 22:25$ UT и 00 MLT, измеренная спутником NorSat-1 в координатах AACGM. Синие прямоугольники показывают приблизительные границы ПД.

Следует отметить, что горизонтальная скорость дрейфа ионов внутри полосы ПД в 00 MLT, где спутник NorSat-1 в рассматриваемом случае измерял параметры плазмы вблизи ионосферных станций, обычно выше, чем в 18 MLT (Karlsson et al., 1998), где спутник DMSP F-18 регистрировал скорости дрейфа ионов (600–700 м/с). Сильная полоса ПД в 00 MLT может привести к стратификации и мелкомасштабным неоднородностям параметров плазмы, а также к такому оптическому явлению как STEVE. Согласно Рисунку 3.14 примерно в 22:25 UT в секторе 00 MLT спутник NorSat-1 пролетел над ионосферной станцией Ладушкин (широта 50.34° и долгота 95.39° в координатах AACGM). Этот пролет позволяет напрямую сравнить результаты измерений как со спутника, так и с наземной ионосферной станции в одном и том же месте и в одно и то же время. Динамика концентрации и температуры электронов, полученная из данных высокого разрешения с m-NLP показана на нижней панели Рисунка 3.16. В пределах широтного интервала между 54.1° и 53.5° геомагнитной широты, который является типичной шириной и расположением ПД, находится более глубокая часть ГИП на его полярной стенке, расположенная между 54.4° и 53.5° . Как известно, ПД обычно располагается внутри

ГИП на его полярной стенке (Anderson et al., 1991; Khalipov et al., 2001). В этой области провал электронной концентрации совпадает с повышением электронной температуры, что также характерно для ПД (Schunk et al., 1976; Афонин и др., 1989; Rodger et al., 1992; Prölss, 2006), хоть и не всегда повышение температуры свидетельствует о наличии ПД. Следует отметить, что ширина ПД на верхней панели Рисунка 3.16 определена приблизительно на основе ширины интервала широт с повышенной горизонтальной скоростью дрейфа ионов, а на нижней панели — приблизительно на основе типичной для ПД ширины провала электронной концентрации (1° – 2°). Неопределенность в определении границы ПД составляет около 0.5° . Внутри ПД наблюдаются два заметных локальных провала электронной концентрации, совпадающих с повышением электронной температуры на геомагнитных широтах 54.05° – 53.85° и 53.7° – 53.55° . Количество (две) и ширина (0.2° и 0.15° широты) этих структур позволяют предположить, что они представляют собой крупные страты ПД, указывая на то, что наблюдаемый ПД является стратифицированным (СПД). Эти крупные страты и мелкомасштабные неоднородности параметров плазмы внутри них могут вызывать многократные переотражения зондирующих сигналов внутри СПД, которые могут быть видны на ионограммах. Согласно Рисункам 3.15 и 3.16, спутник Swarm В обнаружил наличие ПД в 21:17–21:18 UT, примерно в 240 км к северу от ионозонда в Троицке (Москва). Интересно также отметить, что внутренняя структура ПД (количество и размер предполагаемых страт) по данным NorSat-1 в 22–23 UT 18 марта 2018 года напоминает структуру СПД в 19 UT 18 марта 2018 года, рассмотренного во второй Главе диссертационной работы (Рисунок 2.2). Это может означать, что это один и тот же СПД, который за 3.5 часа сдвинулся на $\sim 2^{\circ}$ к полюсу, при этом сохранив свою структуру из двух крупных страт, что, в свою очередь, подтверждает, что страты ПД не являются краткосрочными флуктуациями внутри СПД, а представляют собой долгоживущие структуры, из которых он состоит.

В рассматриваемый период на верхней панели Рисунка 3.14 наблюдаются три основных магнитных возмущения: с 14 до 16, с 18 до 20 и с 21 до 23 UT. В период с 14 до 16 UT в Z-компоненте образуется положительный пик, а в H-компоненте — отрицательный. Между 18 и 20 UT в Z-компоненте появляется отрицательное возмущение, в D-компоненте — положительный пик, а в H-компоненте — положительное возмущение, переходящее в отрицательное. Заметим, что при наблюдении положительного пика в H-компоненте в D-компоненте наблюдается отрицательный пик. Аналогичное поведение всех компонент магнитного поля наблюдается в интервале 21–23 UT. Следует отметить, что интенсивность вариаций магнитного поля в этом временном интервале выше, особенно для Z- и D-компонент. Вариации H-компоненты в течение этих периодов составляли ~ 50 – 100 нТл и имели одинаковый вид при изменении знака вариации (от положительной к отрицательной). Подобное поведение

Н-компоненты во время прохождения ПД 18 марта 2018 года наблюдалось и по измерениям магнитометра в Антарктиде (Рисунок 3.5). Из этого можно сделать вывод, что магнитные вариации Н-компоненты над станцией Ладушкин указывают на возможное образование ПД в интервалах времени 18–20 и 21–23 UT.

Далее рассмотрены ионограммы полученные в этот период с ионозондов в Троицке, Ладушкине и Юлиусрухе. На Рисунке 3.15 видно, что помимо увеличения магнитной активности по локальным измерениям в Ладушкине (см. Рисунок 3.14), наблюдается также увеличение аврорального индекса АЕ (Рисунок 3.17а). Наряду с ростом возмущений магнитного поля, в 18:45 UT ионосферная плазма начинает двигаться вверх (положительные значения V_z). Ранее, в 18:15 UT, горизонтальная скорость дрейфа V_h увеличивается (панель с) с азимутом около 270° , то есть на запад (панель d). По мере развития ПД ионограммы изменяются. Таким образом, начиная с 18:15 UT, критическая частота слоя F начинает падать быстрее обычного. В то же время, в 18:30 UT, на ионограммах, показанных на Рисунке 3.17 (панель f, синий цвет в обыкновенной ветви электромагнитной моды), появляются рассеянные сигналы с северного направления. Цветовое соответствие направлению прихода сигналов указано справа от панели i). В то же время на панели f показаны, хотя и в меньшем количестве, оранжевые сигналы, идущие с юго-юго-запада. Это говорит о том, что ПД, который, вероятно, является причиной ионосферной турбулентности в рассматриваемое время, расположен несколько севернее Троицка (что подтверждается спутниковыми данными), поэтому ионозонд принимает сигналы, отраженные сверху, плюс рассеянные с севера и юга. Кроме того, в 20:00 UT на ионограмме (панель g) сигналы с севера отсутствуют, наблюдаются лишь рассеянные сигналы из зенита (красные в обыкновенной ветви электромагнитной моды и зеленые в необыкновенной) и более слабые сигналы с юго-юго-запада (оранжевые). К этому времени критическая частота F-слоя снижается до 2 МГц. Далее, в 21:20 UT (панель h) почти все рассеянные сигналы приходят с юго-юго-запада, то есть ПД развивается почти над Троицком. Стоит отметить, что в этот момент наблюдаются 2–3 почти сливающихся следа, которые могут иметь физический смысл и отражать стратифицированную структуру ПД в рассматриваемый день. Кроме того, ионограмма в 22:30 UT вообще не содержит сигналов обыкновенной компоненты (панель i). По-видимому, это момент наибольшего смещения ПД на юг. Затем ПД начинает слегка сдвигаться на север.

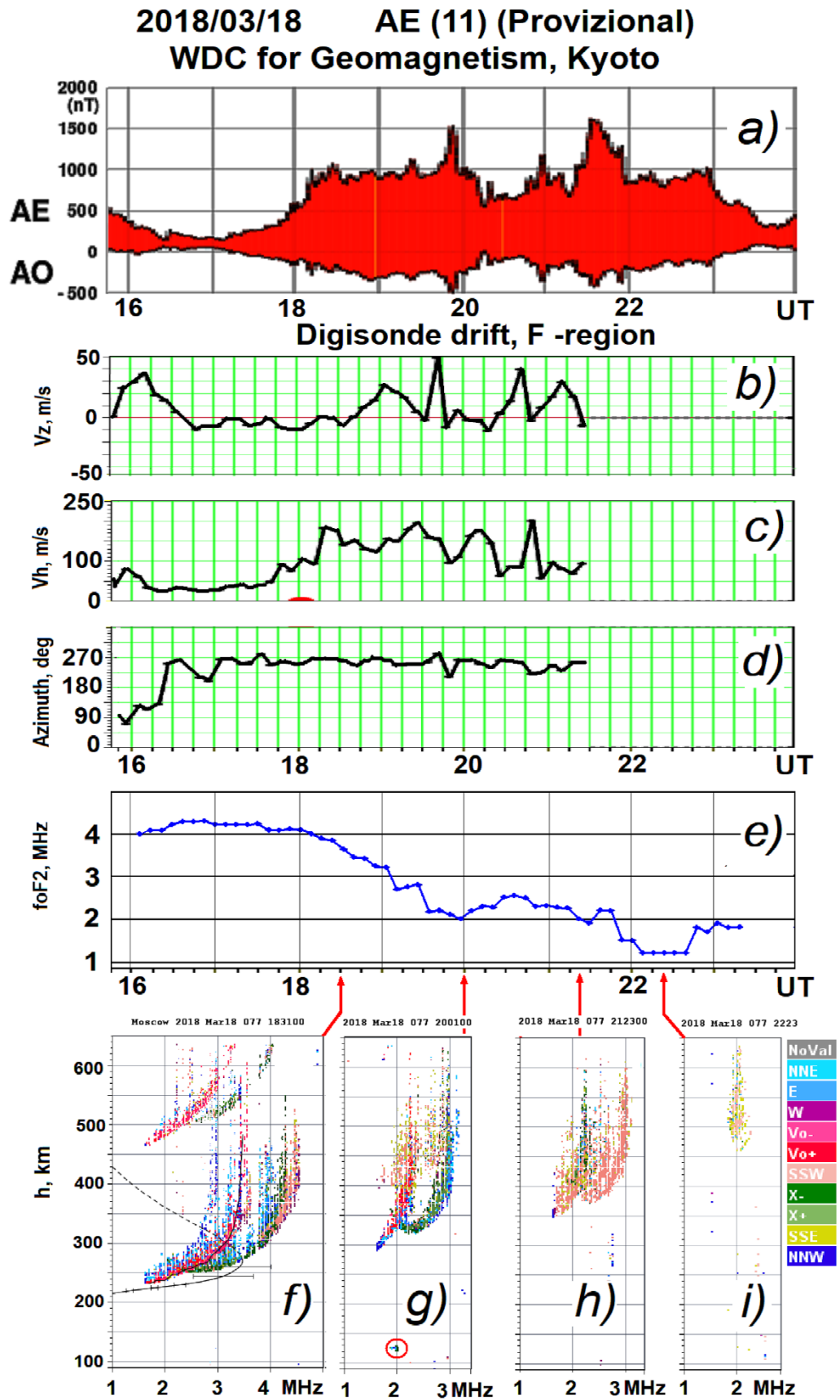


Рисунок 3.17 — (а) Индекс АЕ на 18 марта 2018 года. (б) Вертикальная скорость дрейфа в нижней части F-слоя. (с) Горизонтальная скорость дрейфа. (д) Направление дрейфа. (е)

Изменение критической частоты (f_oF2). (f – i) Ионограммы станции MO155, Троицк, Москва, иллюстрирующие характеристики, связанные с ПД.

Аналогичная картина наблюдается и по данным ионосферного зондирования в Ладушкине (Рисунки 3.18 и 3.19). До 18:00 UT существенных особенностей не наблюдается, за исключением следов слоя Es между 16:45 и 18:15 UT. Начиная с 18:15 UT, появляется F-рассеяние и значительное поглощение, которые наблюдаются во всех последующих ионограммах, в том числе и в 24:00 UT. В 20:30 UT F-рассеяние усиливается, и становится видно расщепление следов (панель b на Рисунке 3.19). К 21:30 UT компоненты «О» и «Х» сливаются (панель c на Рисунке 3.19), а к 22:30 UT плотность ионов в ионосфере над ионозондом значительно падает, в результате чего компонента «О» практически не отражается, остается лишь след компонента «Х» (панель d на Рисунке 3.19). Такое изменение ионограмм на Рисунке 3.19, вместе с резким падением f_oF2 на Рисунке 3.18, представляет собой характерную картину развития ПД вблизи или над точкой наблюдения. Следует отметить, что вместо следа F3s, наблюдаемого над Якутском (Сивцева и др., 1983; Филиппов и др., 1984; Степанов и др., 2017), в рассматриваемом случае над Калининградской областью в период с 18:15 до 21:30 UT формируется дополнительный след, очень близкий к основному, но четко различимый (панель a на Рисунке 3.19). Это может указывать на то, что ионозонд Ладушкин располагался под областью внутри провала электронной концентрации, связанного с ПД. В этом случае ионограмма создается следами, отраженными от двух близко расположенных стенок провала электронной концентрации. Наличие F-рассеяния в ионограммах указывает на присутствие средне- и мелкомасштабных неоднородностей электронной концентрации в рассматриваемой области. Этот вывод хорошо согласуется с формированием страт внутри ПД (СПД), как это наблюдается в спутниковых данных высокого разрешения.

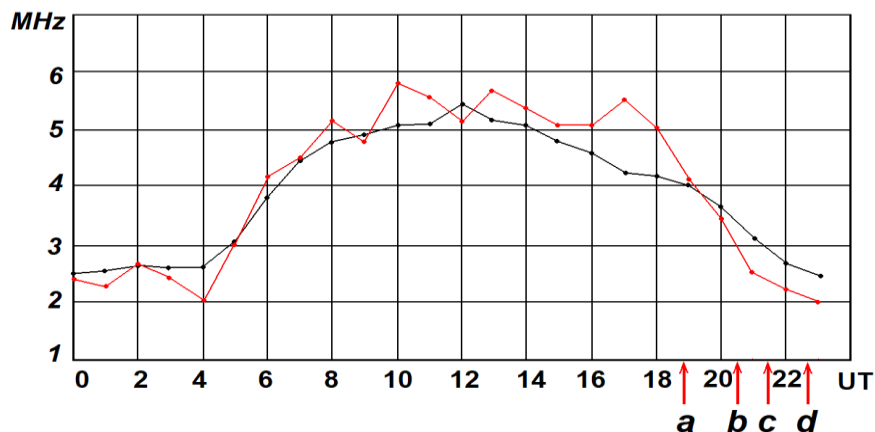


Рисунок 3.18 — Критическая частота F-слоя (f_oF2) за 18 марта 2018 года (красная линия) и f_oF2 , усредненная за предыдущие четыре дня: 12, 13, 14 и 16 марта (черная линия), согласно

данным ионозонда станции Ладушкин. Стрелками отмечены моменты, когда были получены ионограммы на Рисунке 3.19.

К сожалению, ионозонд Парус-А в Ладушкине не позволяет измерить скорости дрейфа в ионосфере и тем самым напрямую подтвердить развитие ПД. Однако на относительно небольшом расстоянии от Ладушкина (430 км по долготе) расположен ионозонд DPS-4 (JR055, Юлиусрух). Ионограммы, иллюстрирующие конкретные проявления ПД вблизи Юлиусруха, показаны на Рисунке 3.19. В отличие от данных ионозонда в Троицке, где на Рисунке 3.17 показаны результаты расчетов с использованием программы DriftExplorer, зависимость скоростей дрейфа на Рисунке 3.20 была построена вручную путем извлечения скоростей V_h и V_z из изображений SkyMaps.

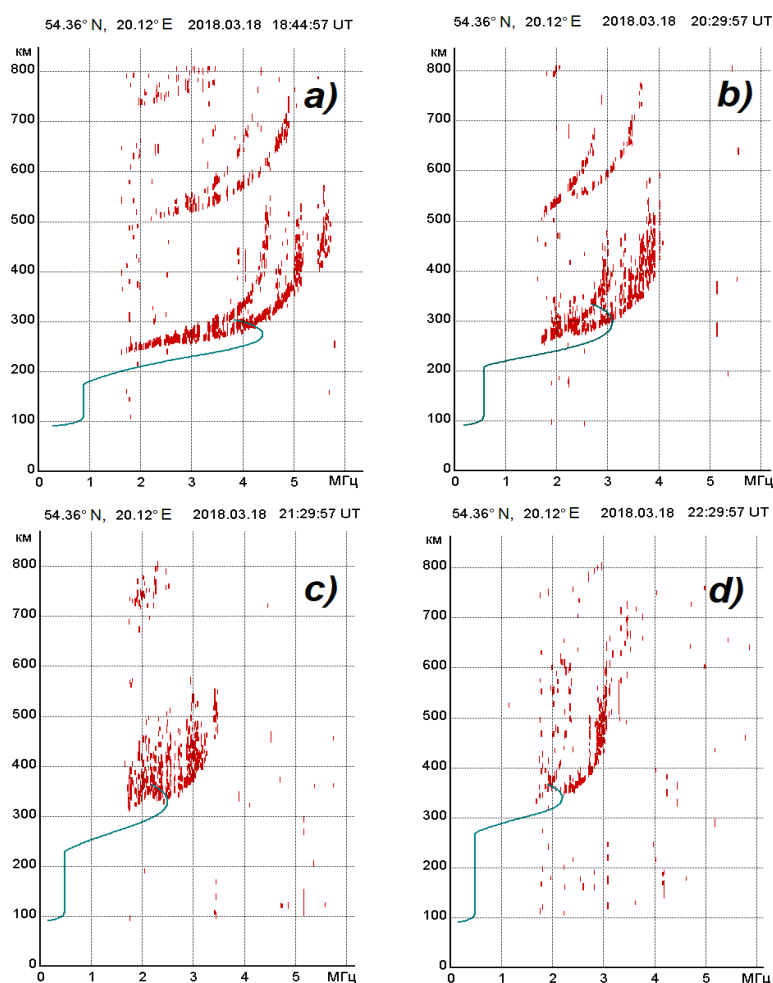


Рисунок 3.19 — Ионограммы со станции Ладушкин, иллюстрирующие характерные особенности, связанные с ПД. Моменты их регистрации на Рисунке 3.18 отмечены стрелками.

При рассмотрении данных со станции Юлиусрух на Рисунке 3.20, можно наблюдать особенности, аналогичные тем, которые отмечены в данных ионозондов в Троицке и Ладушкине. До 16:00 UT ионограммы не показывают существенных особенностей, а измеренные скорости дрейфа остаются в пределах обычного диапазона. 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 V_h , до 200 м/с и более. По мере развития события ионограммы также изменяются. 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 по ионограммам (Степанов и др., 2017). 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». Весь комплекс изменений критической частоты, характерные особенности ионограмм и увеличение скорости горизонтального дрейфа указывают на развитие ПД вблизи станции JR055, Юлиусрух.

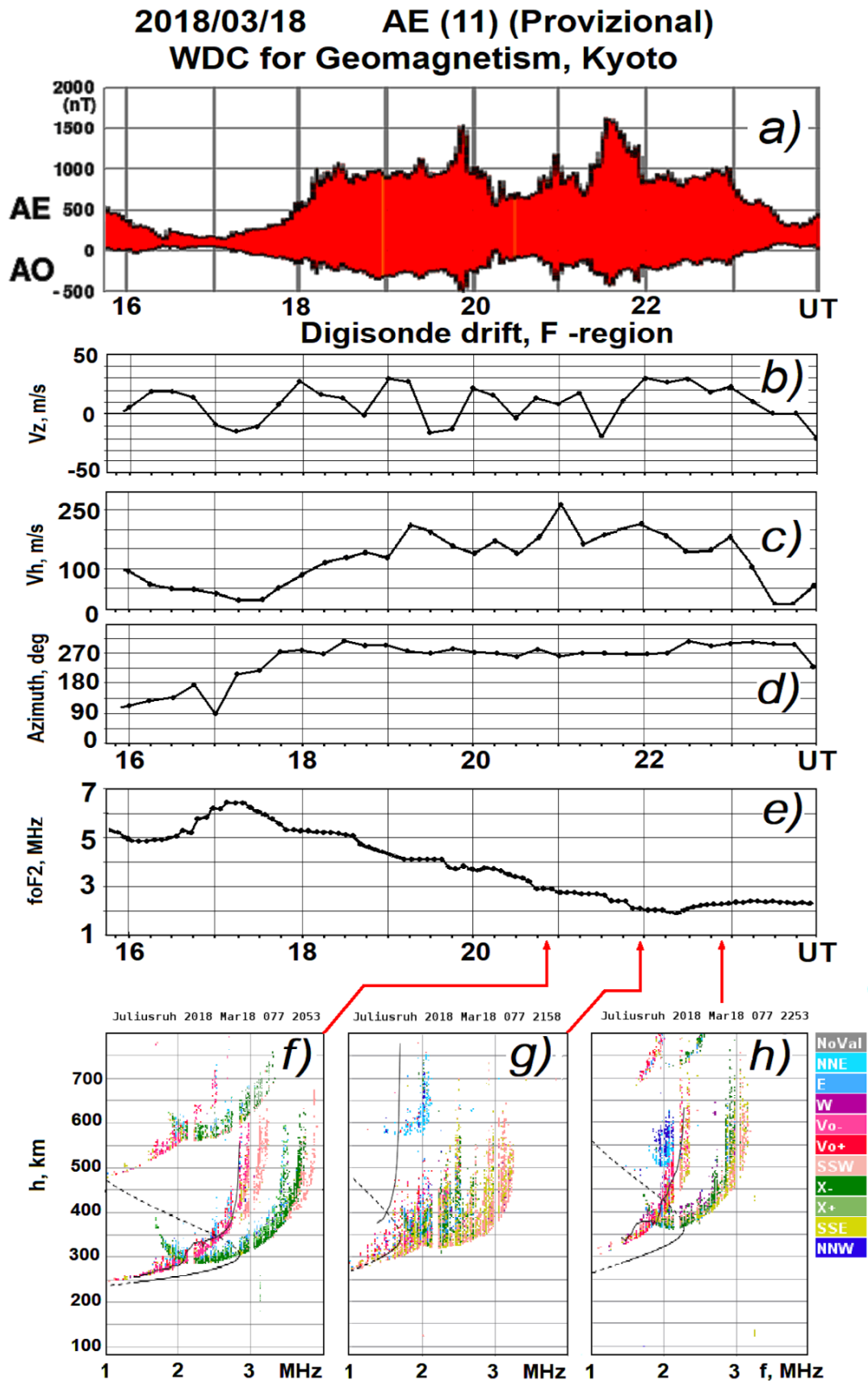


Рисунок 3.20 — (а) Индекс АЕ (панель а) 18 марта 2018 года. (б) Вертикальная скорость дрейфа в нижней части F-слоя. (с) Горизонтальная скорость дрейфа. (д) Направление дрейфа. (е) Изменение критической частоты ($foF2$). (f–g) Ионограммы станции JR055, Юлиусрух, Германия иллюстрирующие характерные особенности, связанные с ПД.

При сравнении оценок скорости дрейфа, полученных с помощью ионозондов DPS-4, со спутниковыми данными следует учитывать, что DPS-4 измеряют скорости на высотах ниже максимума ионизации (180–250 км), а спутники летают гораздо выше, где плотность нейтральных частиц на порядки ниже. Следовательно, вязкое трение, воздействующее на ионы на высотах спутников, значительно ниже, что приводит к заметно более высоким наблюдаемым скоростям дрейфа по сравнению с теми, которые регистрируются приборами DPS-4. Это заметно при сравнении Рисунка 3.16 с Рисунками 3.17 и 3.20, на которых одновременно скорость горизонтального дрейфа на высотах нижней части F-области составляет 200 м/с, а на высоте полета DMSP (800 км) — 600–700 м/с.

На Рисунке 3.21 представлено сравнение локальных карт полного электронного содержания (ПЭС) в географических координатах в районе расположения станций в Троицке, Ладушкине и Юлиусрухе в 12–24 UT 18 марта 2018 года. Согласно средней панели Рисунка 3.14, уровень геомагнитных возмущений был низким ($SME < 500$ нТл) до ~14 UT, затем геомагнитная активность возросла, достигнув пика в 21–22 UT ($SME > 2000$ нТл). На Рисунке 3.21 в интервале времени от 12 до 14 UT карты ПЭС соответствуют геомагнитно-спокойному времени: на них не виден провал ПЭС, поскольку он расположен севернее, имеет большую ширину и меньшую глубину. С 15 до 17 UT наблюдается смещение минимума ПЭС в сторону широт 70° – 60° , что соответствует увеличению геомагнитного индекса SME , а значение ПЭС в полосе минимума уменьшается до 3–5 TECU (TEC Unit, $1 \text{ TECU} = 10^{16}$ электронов/м²). С 18 до 21 UT значение ПЭС падает до 2–3 TECU, опускаясь до широт 60° – 50° и смещаясь на запад. Узкая ширина ($< 10^{\circ}$) и расположение на субавроральных широтах (географические широты 60° – 50° на этих долготах соответствуют приблизительно 56° – 45° геомагнитным широтам в системе AACGM) во время высокой геомагнитной активности указывают на вероятную связь этого провала ПЭС с ГИП и SAPS/ПД (Makarevich et al., 2011; Clausen et al., 2012; Makarevich, Bristow, 2014). Учитывая, что на этих широтах и в это время по спутниковым данным обнаружены явления STEVE и ПД, а также признаки ПД на ионограммах станций в Троицке, Ладушкине и Юлиусрухе, можно утверждать, что наблюдаемый узкий провал ПЭС является одним из проявлений ПД, обсуждаемых в текущем разделе. Таким образом, эти результаты подтверждают результаты предыдущих исследователей, которые использовали одновременные измерения ПЭС с помощью GPS-приемников и радиолокационных/спутниковых данных для изучения SAPS, показывая, что SAPS располагался, как и ожидалось, в области низких значений ионосферного ПЭС.

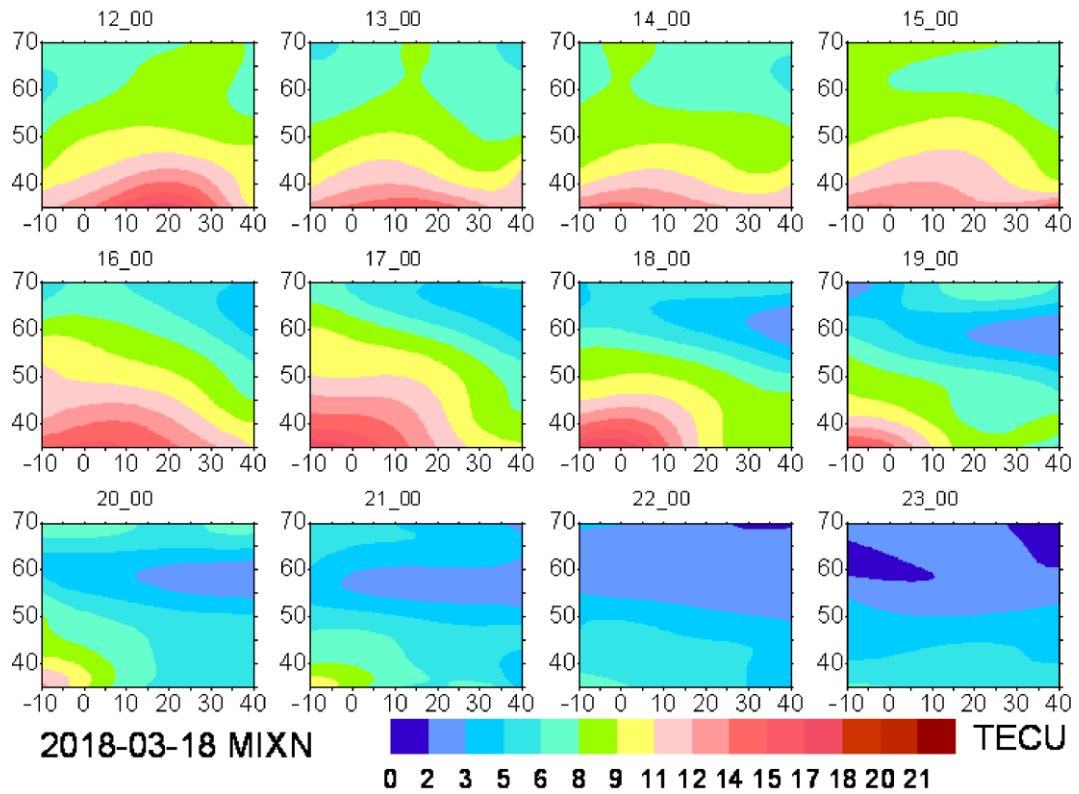


Рисунок 3.21 — Локальные карты ПЭС на 12–23 UT 18 марта 2018 года для географических широт от 35° до 70° и географических долгот от 10° до 40° , что соответствует району расположения станций в Троицке, Ладушкине и Юлиусрухе.

18 марта 2018 года фотографы-любители зафиксировали присутствие STEVE в северной Германии. На верхней панели Рисунка 3.22 показана фотография, сделанная недалеко от города Киль в 20:19 UT, а на нижней панели Рисунка 3.22 — фотография, сделанная недалеко от города Котелов в 21:13 UT. На обеих фотографиях STEVE представляет собой размытую полосу фиолетового и сиреневого свечения, расположенную к экватору от зеленого полярного сияния. Согласно картам, места наблюдения STEVE находятся на тех же широтах, что и ионосферные станции Юлиусрух, Ладушкин и Троицк. Кроме того, как явствует из Рисунка 3.14 ПД был обнаружен на этих широтах в 22:26 UT. Наличие STEVE на этих широтах дополнительно подтверждает присутствие сильного ПД в рассматриваемое время и в рассматриваемом месте (Archer et al., 2019; MacDonald et al., 2018; Harding et al., 2020).



Рисунок 3.22 — STEVE, сфотографированный фотографами-любителями в Северной Германии в 20–21 UT 18 марта 2018 года. Верхняя панель — фотография, сделанная в окрестностях Кия в 20:19 UT. Нижняя панель — фотография, сделанная в окрестностях Котелова в 21:13 UT.

3.4 Обсуждение

В третьей Главе рассмотрено влияние ПД на распространение радиоволн в субавроральных широтах: влияние на навигационные сигналы ГНСС в Антарктиде и влияние на зондирующий сигнал ионозонда в Северной Европе. Результаты исследования в южном полушарии актуальны также и в северном полушарии и наоборот, поскольку во время геомагнитной активности ПД появляется одновременно в обоих полушариях (Burke et al., 2000; Puhl-Quinn et al., 2007; Kunduri et al., 2012).

В Антарктиде, вблизи и над Землей Королевы Мод исследовано воздействие ПД на потери сигнала, а также фазовые и амплитудные сцинтилляции принимаемого радиосигнала от спутников ГНСС в субавроральной области южного полушария. Для точного определения наличия ПД в данном месте использованы данные спутников DMSP F-17, DMSP F-18, Swarm C, Swarm B и NorSat-1, которые подтвердили наличие ПД в субавроральной области во время геомагнитной суббури 18 марта 2018 года. Согласно анализу, ПД существовал во время рассматриваемого события, по крайней мере, с 19:00 UT 18 марта 2018 года до 02:00 UT 19 марта 2018 года. На основе своих исследований (Anderson et al., 1991) пришли к выводу, что типичная продолжительность жизни ПД составляет от 30 минут до 3 часов. Механизмы образования ПД позволяют этим явлениям существовать в течение более длительного периода

во время геомагнитных бурь благодаря непрерывному притоку энергии из магнитосферы/ионосферы (Southwood, Wolf, 1978; Anderson et al., 1991; Mishin, Puhl-Quinn, 2007). Также вероятно, что ПД может ослабевать и вновь появляться во время одного геомагнитного события в зависимости от изменений геомагнитной активности. Согласно различным спутниковым данным, рассматриваемый в данном исследовании ПД расположен между -53° и -65° геомагнитной широты в южном полушарии и от 16 до 02 MLT, что хорошо согласуется с данными (Spiro et al., 1979; Karlsson et al., 1998), которые, основываясь на статистических данных, утверждают, что характерные инвариантные широты ПД находятся между 55° и 65° и что ПД может растягиваться вдоль широты более чем на ~ 6 часов MLT в ночном и вечернем секторах. На Рисунке 3.7 видно, что ПД, обнаруженный спутниками DMSP F-18, DMSP F-17 и Swarm C, расположен на более высоких широтах (приблизительно -59° , -60° и -65° геомагнитной широты соответственно), чем ПД, обнаруженный Swarm B ($\sim -55^\circ$ в 22:20 UT и $\sim -57^\circ$ в 20:48 UT) и NorSat-1 ($\sim -54^\circ$). Это объясняется тем, что средняя магнитная широта ПД снижается с увеличением MLT при переходе от вечернего к послеполуночному сектору. Широта рассматриваемой области ПД составляет около 1° , что также является характерной чертой ПД, и большинство исследователей сходятся во мнении, что типичная ширина ПД находится в диапазоне от 1° до 2° .

В процессе формирования ПД интенсивные электрические поля приводят к сильным потокам плазмы, вызывая фрикционный нагрев, который, в свою очередь, приводит к повышению температуры плазмы. Джоулев нагрев может усиливать скорость ионосферной рекомбинации, что приводит к уменьшению концентрации электронов. Нагрев плазмы приводит не только к горизонтальному, но и к вертикальному дрейфу, что означает резкое повышение температуры и перенос плазмы вверх (Anderson et al., 1991; Khalipov et al., 2016a, 2016b). Взаимодействие нейтральной атмосферы и ионизированной плазмы (ионное увлечение) может приводить к значительным изменениям в термосферных ветрах. Эти ветры могут перераспределять тепло и вызывать колебания температуры, которые, в свою очередь, влияют на плотность плазмы и создают нерегулярные структуры. Градиенты температуры могут вызывать плазменные неустойчивости, такие как градиентно-дрейфовая неустойчивость. (Liu et al., 2021) используя данные Swarm, показывают, что градиентно-дрейфовая неустойчивость температуры возникает в ГИП у его полярной стенки.

Данное исследование проводилось в период минимальной солнечной активности в южном полушарии, вблизи условий равноденствия. В этих условиях сопряженная точка в северном полушарии подвержена более высокой инсоляции из-за разницы между магнитными и геодезическими полюсами и выражается в более высокой фоновой концентрации электронов. Фоновые значения имеют решающее значение для возникновения сцинтилляций (Yeh, Liu,

1982). В высоких широтах важны как E-, так и F-области. В каждой области относительная флуктуация плотности должна превышать соответствующий фоновый уровень, чтобы увеличение плотности оказало влияние на сигналы ГНСС (Madhanakumar et al., 2024). (Sousasantos et al., 2024) показывают четкую связь между фоновыми плотностями F-области, полученными с помощью данных GOLD, и интенсивностью сцинтилляций для индекса S4 в низкоширотной области. Кроме того, более высокая фоновая плотность увеличивает ионосферную проводимость, что влияет на электрические поля и токи в E-области, которые, в свою очередь, влияют на интенсивность ПД (Zhang et al., 2010).

Структурированность плазмы, высокоскоростные потоки и неоднородности в ионосфере могут вызывать ухудшение качества связи и точности позиционирования, обрывы сигнала и потерю синхронизации (Oksavik et al., 2015; Jin, Oksavik, 2018; Chernyshov et al., 2020a). Известно, что быстрые изменения в ионосфере могут приводить к сцинтилляциям и флуктуациям в измерениях фазы и амплитуды (Kintner, Ledvina, 2005). Кроме того, рассеяние на нерегулярных структурах в ионосфере может вызывать случайные модуляции амплитуды и фазы трансionoсферных радиосигналов (Rino, 1979). Рассмотренные ранее спутники имеют малый угол возвышения. Согласно работе (Vasylyev et al., 2024), зенитный угол приемника 85° соответствует зенитному углу в точке рассеяния на графиках около 40.9° , что приводит к усилению сцинтилляций для нескольких конфигураций связи в глобальном масштабе (которые соответствуют значениям 0.16 и 0.3 рад для S4 и σ_f в Антарктиде). На высоких широтах как фазовые, так и амплитудные сцинтилляции радиосигналов мешают связи и навигации, поскольку ионосферные неоднородности обычно усиливаются в периоды геомагнитной активности (Spogli et al., 2009). Динамика субавроральной ионосферы во время суббури обусловлена взаимодействием кольцевого тока и плазмосферы/плазмопаузы, что приводит к увеличению потоков западной конвекции, то есть к появлению ПД, где расположены нерегулярные области провалов плотности плазмы и повышенной электронной температуры, что приводит к сцинтилляциям на субавроральных широтах (Mishin, Blaunstein, 2008). Это одни из самых быстрых потоков, наблюдаемых в ионосфере, поэтому сцинтилляции, наблюдаемые в этом регионе, должны иметь другие свойства (Wang et al., 2018). В области ПД наблюдается увеличение индексов как фазовых, так и амплитудных сцинтилляций. Индекс фазовой сцинтилляции чувствителен к крупным (больше масштаба Френеля) и мелким неоднородностям вдоль пути сигнала, тогда как индекс S4 является индикатором мелких неоднородностей меньше масштаба Френеля. Масштаб Френеля при $n = 1$ составляет около 365 м на высоте 350 км для частоты L1 (Kintner et al., 2007). Изменения этих двух индексов указывают на наличие плазменных неоднородностей разных масштабов и эти масштабы соответствуют полученным в предыдущих Главах диссертационной работы масштабам

неоднородностей внутри страт ПД (от десятков километров до сотен метров). Также тот факт, что во время повышенной геомагнитной активности фазовые сцинтилляции внутри ПД более выражены, чем амплитудные, подтверждает результат первой Главы о том, что во время геомагнитной активности более крупные неоднородности преобладают над мелкими. Все указанное выше означает, что внутренняя мелкомасштабная структура ПД (страты ПД и неоднородности параметров плазмы внутри них), исследованная в первой и второй Главе работы, вызывает увеличение фазовых и амплитудных сцинтилляций, а также потерю сигналов ГНСС.

В Северной Европе с помощью широкого набора измерительных инструментов рассмотрено влияние ПД на распространение зондирующего сигнала ионозондов, то есть на отражение признаков ПД на ионограммах. Формирование ПД на высотах ионосферы приводит к значительному снижению f_oF2 и повышению высоты слоя F2, что может быть точно определено с помощью ионозондовых измерений. Анализ ионограмм, записанных во время развития ПД вблизи зенита станции, выявил быстрое снижение f_oF2 на 2–4 МГц, происходящее в течение короткого промежутка времени 15–30 мин. По мере развития ПД на ионограммах ионосферных станций появляются дополнительные следы отражений, идентифицированные как отражения F3s. Эти отражения служат основным ионосферным индикатором ПД (Сивцева и др., 1983; Филиппов и др., 1984; Galperin et al., 1986; Степанов и др., 2017).

Быстрые дрейфы над станциями в Троицке, Ладушкине и Юлиусрухе, расположенными к югу от субавроральной зоны, наблюдаются относительно редко, как правило, когда авроральная геомагнитная активность превышает определенный порог. Над Троицком западные дрейфы ионов со скоростями около 100 м/с в нижней части F-слоя (180–200 км) наблюдаются при значениях АЕ от 600 до 1100 нТл. Когда геомагнитный индекс АЕ превышает 1100 нТл, обычно наблюдаются скорости выше 150 м/с, что делает 150 м/с порогом для обнаружения ПД на ионограммах в Троицке, Ладушкине и Юлиусрухе. Как правило, полосы ПД лежат к северу от станций ионозондов и смещаются к их широтам или дальше на юг только во время экстремальных геомагнитных возмущений. На основании одних лишь ионограмм пространственное положение ПД можно определить лишь приблизительно, и его следует уточнять с помощью измерений «in situ» с использованием космических аппаратов, как было сделано в текущей Главе. При сравнении оценок скорости дрейфа ионозондов DPS-4 со спутниковыми данными следует учитывать, что DPS-4 измеряет не дрейф ионов напрямую, а фазовые скорости волн или неоднородностей (Panchenko et al., 2019), которые могут быть меньше, особенно для сверхзвукового дрейфа ионов. Другой причиной расхождений может быть то, что измерение дрейфа ионов со спутника практически локальное и не усредненное по времени, в то время как DPS-4 усредняет скорости по пространственной области (радиусом

около нескольких десятков км) и времени (около 3–4 мин). Тот факт, что ионосферная область, где происходит ПД, обычно представляет собой лишь часть объема, по которому выполняется усреднение, дополнительно снижает оценку средней скорости дрейфа. Следует отметить, что, несмотря на эти особенности наземных измерений скорости, одним из преимуществ наземных ионосферных наблюдений, включая такие явления, как ПД в субавроральной области, является возможность проведения непрерывного мониторинга, в то время как спутниковые измерения и ограничены по MLT и временем пролета.

Согласно данным станций измерения магнитных вариаций, появление ПД характеризуется биполярной магнитной вариацией в Н-компоненте, аналогичной быстрому прохождению разрыва Харанга над станцией. В этом случае ПД формируется еще до положительной фазы изменения магнитного поля. Из этого можно сделать вывод, что магнитные вариации в Н-компонентах также можно рассматривать как индикатор формирования ПД.

Ниже еще раз перечислены характерные особенности ионограмм, которые могут указывать на наличие ПД вблизи точки наблюдения, в порядке убывания значимости:

1. Появление на ионограмме дополнительных следов, так называемых F3s, которые расположены выше обычных следов F2 и имеют более низкую критическую частоту, чем F2. Эти следы могут иметь U-образную форму днем или выглядеть как «правая половина U» ночью, когда левая половина не отображается на ионограмме из-за ограниченного частотного диапазона ионозонда;

2. Расщепление следа F2 на два или более следа в его верхней части, как видно на ионограммах на Рисунках 3.15 и 3.18;

3. Появление следов слоя Es аврорального типа, которые указывают на высыпание частиц вблизи точки наблюдения. Следы таких слоев Es аврорального типа присутствуют на Рисунке 3.15h;

4. Быстрое падение критической частоты слоя F2 из-за оттока плазмы на запад в вечернем секторе;

5. Появление отражений от полярного края ГИП, так называемых следов F2s, расположенных справа от следа F2, имеющих слабый частотный наклон и отображаемых синим цветом на ионограммах DPS-4, поскольку они приходят с северного направления. Следы F2s обычно появляются во время сильных магнитных бурь и не наблюдались 18 марта 2018 года;

6. Появление характерных разрывов в частоте на ионограмме — «лакун F». Эта особенность имеет ограниченное значение для диагностики наличия ПД, поскольку она также может быть вызвана техническими причинами.

Используя спутниковые данные, можно как определить положение и время ПД, так и изучить его внутреннюю мелкомасштабную структуру «in situ». Исследование зависимости геомагнитной широты ПД от времени и долготы (MLT) показало, что при постоянно высоком уровне геомагнитной активности (за исключением ~ 18 MLT в 22–23 UT) геомагнитная широта ПД в рассматриваемом случае уменьшается со скоростью $1.5\text{--}2^\circ$ в час ~ 00 MLT и $0.5\text{--}1^\circ$ в час ~ 18 MLT. Кроме того, ПД расположен ближе к полюсу ~ 00 MLT по сравнению с ~ 18 MLT. Зависимость геомагнитной широты ПД от времени и долготы ранее не изучалась. В статье (Foster, Vo, 2002) представлены вариации средней геомагнитной широты SAPS от MLT. Согласно их исследованию, средняя скорость уменьшения широты SAPS составляет $\sim 0.7^\circ$ за 1 час MLT. Как уже было отмечено выше в первых двух Главах работы, в статье (Karlsson et al., 1998) на рисунке (таблица 1) показана зависимость геомагнитной широты ПД от MLT при различных индексах Кр. Хотя это не описано в тексте, из рисунка можно сделать вывод, что средняя скорость уменьшения геомагнитной широты составляет $\sim 0.55^\circ$ за 1 час MLT. Следует отметить, что рисунок в статье (Karlsson et al., 1998) основан на наблюдениях большого количества событий со спутника Freja, тогда как в данной Главе всесторонне рассмотрен один геомагнитный случай, однако полученные здесь результаты сопоставимы с результатами (Karlsson et al., 1998).

Поскольку ПД, скорее всего, возникает вблизи проекции плазмопаузы на ионосферу, ожидается движение ПД в направлении экватора одновременно с сокращением плазмопаузы при увеличении геомагнитной активности (Maynard et al., 1980). Однако движение ПД в направлении полюса примерно на 18 MLT с 21 до 22–23 UT указывает на то, что проекция плазмопаузы на ионосферу неравномерно расширяется и сжимается в течение времени с развитием геомагнитной активности. Согласно упрощенной модели (Grebowsky, 1970), плазмосфера формируется внутри области коротации, граница которой (плазмопауза) определяется балансом между коротацией и магнитосферной конвекцией, вызванной внешним электрическим полем в магнитосфере. В результате образуется область в форме «капли», максимальное расстояние от Земли которой приходится на сектор примерно на 18 MLT. Это наблюдается и в рассматриваемом случае, когда дрейф в вечернем секторе локализован на более высоких широтах по сравнению с ночным сектором MLT.

Следует отметить, что поведение положения ПД в секторе 18 MLT менее монотонно, чем в ночном секторе. Форма плазмосферы на самом деле не так проста, как во многих моделях, и это было четко продемонстрировано измерениями на спутнике IMAGE (Sandel et al., 2003), а также полуэмпирической моделью, основанной на кинетических соотношениях пополнения плазмосферы и на данных Interball-1 (Kotova et al., 2015). Поведение границы в вечернем секторе сложнее, чем в ночном, поскольку после усиления конвекции плазма с

ночной стороны «переносится» на вечернюю сторону, а затем на дневную. В результате временное развитие плазмосферы и плазмопаузы в этих секторах должно различаться, как было показано в (Grebowsky, 1970; Kotova, 2007). Таким образом, результаты текущего исследования еще раз подчеркивают сложную нелинейную взаимосвязь между ПД и ионосферной проекцией плазмопаузы и плазмосферой, то есть физическое моделирование с использованием только самосогласованной формулировки с реалистичными распределениями давления кольцевых токов, R2 FAC и ионосферной проводимостью может помочь по-настоящему отразить динамическое развитие ПД (и SAPS) (Pierrard et al., 2009).

Согласно высокочастотным данным со спутника NorSat-1, рассматриваемый в данной Главе ПД, расположенный на широтах станций Троицка, Ладушкина и Юлиусруха, классифицируется как СПД, состоящий из двух страт ПД. Страты ПД и мелкомасштабные неоднородности параметров плазмы внутри них вызывают многократные отражения сигналов, проходящих через СПД, которые можно наблюдать на ионограммах как F-рассеяние.

В текущем исследовании также использованы локальные карты ПД в районе станций Троицк, Ладушкин и Юлиусрух в рассматриваемый день. В то же время и в том же месте, где с помощью других данных был идентифицирован ПД, наблюдалась узкая, глубокая впадина ПЭС. Характеристики этой впадины четко указывают на ее связь с ПД. Этот вывод согласуется с предыдущими исследованиями, которые предполагают пространственное совпадение между SAPS и узкими падениями ПЭС из-за истощения плотности ионосферной плазмы (Makarevich et al., 2011; Clausen et al., 2012; Makarevich, Bristow, 2014).

Во время рассматриваемого геомагнитного события в том же месте и в то же время, что и ПД в северном полушарии фотографы-любители обнаружили STEVE. После первого научного сообщения о STEVE (MacDonald et al., 2018) многие исследователи пришли к выводу, что STEVE связан с ПД (Archer et al., 2019; Nishimura et al., 2020; Mishin, Streltsov, 2023). Следует отметить, что событие STEVE отличается от полярного сияния, поскольку характеризуется отсутствием высыпания частиц (Gallardo-Lacourt et al., 2018). Согласно механизму генерации STEVE, описанному в (Harding et al., 2020), STEVE возникает только тогда, когда в то же время и в том же месте присутствует сильный ПД (со скоростью дрейфа ионов >4.4 км/с). Это подтверждается измерениями скоростей дрейфа ионов (от 3.9 км/с до 5.5 км/с) в совпадающих областях STEVE и ПД (MacDonald et al., 2018; Archer et al., 2019).

Ионограммы с ионосферных станций выявляют особенности мелкомасштабных неоднородностей параметров плазмы внутри ПД. Это дает возможность использовать ионограммы, в дополнение к другим наземным и спутниковым данным, для мультиинструментального исследования мелкомасштабной структуры ПД в будущих исследованиях. Во время сильных геомагнитных бурь ПД и STEVE происходят на более

экваториальных широтах, где расположены большие территории с относительно высокой плотностью населения, что также указывает на практическую значимость данного исследования.

3.5 Выводы

По результатам исследования влияния ПД на распространение радиоволн с учетом геомагнитной сопряженности ПД между полушариями можно сделать следующие выводы:

— Установлено, что ПД оказывает влияние на прохождение трансионосферного сигнала спутников глобальных навигационных систем, вызывая увеличение амплитудных и фазовых сцинтилляций, а также потерю захвата сигнала;

— Во время ПД с высокой скоростью наблюдалось такое оптическое явление как STEVE в субавроральной области;

— При стабильно высоком уровне геомагнитной активности геомагнитная широта ПД уменьшается со временем UT на $1.5\text{--}2^\circ$ в час в 00 MLT и на $0.5\text{--}1^\circ$ в час в 18 MLT. Кроме того, с увеличением MLT геомагнитная широта уменьшается на $0.8\text{--}1.5^\circ$ в час в MLT;

— Провал электронной концентрации, связанный с ГИП и ПД, наблюдается на локальных картах ПЭС;

— Характерные особенности ПД, включая дополнительные следы, присутствуют на ионограммах с трех наземных ионосферных станций: Троицк, Ладушкин и Юлиусрух;

— Скорость дрейфа в полосе ПД на высотах нижней части F-области в 5–8 раз меньше по сравнению со скоростями дрейфа на высоте спутника DMSP F-18;

— Обнаружено новое явление — СПД (стратифицированный поляризационный джет), которое состоит из нескольких страт ПД. Страты ПД и неоднородности параметров плазмы внутри них вызывают множественные переотражения зондирующего сигнала, что проявляется на ионограммах в виде F-рассеяния;

— В полосе ПД увеличиваются амплитудные и фазовые сцинтилляции, а также потери навигационного сигнала спутников ГНСС, однако следует учитывать геометрию луча, поскольку область диффузной авроры может также вносить свой вклад в сцинтилляции сигнала;

— В практических приложениях (например, для морской навигации) во время геомагнитной активности необходимо учитывать не только высыпание заряженных частиц в авроральном овале, но и развитие ПД в субавроральной области на вечерней и ночной стороне, которое может привести к потере связи с навигационными спутниками.

Глава 4. Поляризационный джет во время экстремальных геомагнитных событий

4.1 Введение к Главе 4

25-й солнечный цикл оказался значительно более активным, чем предполагали многие исследователи. В течение этого цикла произошли мощные солнечные вспышки и корональные выбросы массы (КВМ). Это привело к чрезвычайно интенсивной геомагнитной буре на Земле с 10 по 12 мая 2024 года. Эта геомагнитная буря представляет собой самое интенсивное событие космической погоды XXI века — минимум индекса Dst составлял -412 нТл (позднее был пересчитан до -406 нТл). Несмотря на то, что во время другой экстремальной геомагнитной бури 21 века — 20 ноября 2003 года — минимальный Dst был ниже и составлял -422 нТл, буря 10–12 мая 2024 года превосходит ее по длительности и, соответственно, суммарной мощности. Кроме того, другие геомагнитные индексы, характеризующие степень геомагнитных возмущений — Ap, AE — имели максимальные значения именно во время майского события 2024 года. Понимание и точное описание процессов в магнитосфере, атмосфере и ионосфере Земли (передача энергии, динамика частиц, токи вдоль силовых линий поля, потоки ионосферной плазмы, ускорение и высыпание заряженных частиц, пересоединение и другие) во время таких бурь имеет решающее значение не только для фундаментальных научных знаний, но и для прогнозирования и минимизации их последствий.

Через пять месяцев после бури 10–12 мая 2024 года, 10–12 октября 2024 года произошла еще одна экстремальная геомагнитная буря. Она была менее интенсивной (минимальный Dst = -333 нТл), чем буря в мае этого года, но несмотря на это, Октябрьская буря является одной из мощнейших экстремальных геомагнитных событий 21 века (Pierrard et al., 2025). В (Paul et al., 2025) проведено исследование ее влияния на ионосферу с использованием различных наземных и спутниковых средств. Авторы отмечают значительное повышение высоты слоя F, при этом $foF2$ оставалась относительно стабильной на протяжении бури, за исключением фазы роста. В работах (Li et al., 2025; da Silva Picanço et al., 2025) сообщают о формировании C-образных экваториальных плазменных супер-бабблов (пузырей) во время Октябрьской бури, обусловленных особенностями изменений в солнечном ветре. Экваториальные супер-бабблы во время этой бури, согласно (Zakharenkova et al., 2025), достигали 40° геомагнитной широты, причем вариации ПЭС (индекс ROTI, Rate of change of TEC Index) и амплитудные сцинтилляции сигналов ГНСС возрастали по мере удаления от экватора.

Исторические примеры, такие как геомагнитная буря 1859 года, известная как «событие Кэррингтона», продемонстрировали, что мощные геомагнитные бури могут иметь глобальные последствия. В то время возмущения в ионосфере привели к сбоям в телеграфных системах по

всему миру, и многие телеграфисты пострадали от поражения электрическим током (Carrington, 1859; Tsurutani et al., 2003). Солнечная буря Кэррингтона также вызвала впечатляющие полярные сияния, которые были видны даже в тропиках, включая Карибский бассейн и Таити. Это был первый случай, когда крупные вспышки на Солнце связали с экстремальными геомагнитными возмущениями. Более поздние примеры, такие как буря 1989 года (самая мощная в космическую эру), вызвавшая масштабное отключение электроэнергии в Квебеке, подчеркивают, что последствия в наше время могут быть еще более серьезными. Мощный КВМ на Солнце вызвал значительную геомагнитную бурю, что привело к отключению управления некоторыми спутниками на полярных орбитах, срабатыванию автоматических выключателей в энергосистеме Квебека (Канада), и парализовало транспортные системы, питающиеся от этой электросети (Bolduc, 2002). Другим значительным примером являются геомагнитные бури 29 октября 2003 года, известная как «Буря на Хэллоуин», и буря 20 ноября 2003 года — самая мощная буря 21 века до 2024 года. Эти бури вызвали существенные возмущения в ионосфере, приведшие к сбоям в работе спутниковых и навигационных систем (Mannucci et al., 2005; Horvath, Lovell, 2010), но почти не повредили электроэнергетические системы на Земле, в значительной степени благодаря урокам, извлеченным из Квебекского события.

Хорошо известно, что геомагнитная активность оказывает воздействие на верхние слои атмосферы, ионосферу и магнитосферу на всех широтах и местных временах. Наблюдаемые эффекты вблизи поверхности Земли на низких, средних и высоких широтах различаются и часто изучаются как отдельные явления, хотя все они взаимосвязаны. Степень и характер различных эффектов, вызванных геомагнитной бурей, определяются несколькими факторами, включая максимальные магнитные отклонения (показатель мощности кольцевого тока), минимальную широту авроральных областей (указывающую на объем инжектированной плазмы во внутреннюю магнитосферу), минимальное радиальное расстояние магнитопаузы (отражающее динамическое давление солнечного ветра) и скорость начала бури (на которую влияют условия на фронте ударной волны, распространяющейся через солнечный ветер, и ориентация межпланетного магнитного поля (ММП)). Все эти эффекты взаимосвязаны, но эти взаимосвязи сложны и часто нелинейны (Rich, Denig, 1992). ПД, происходящий в ионосфере, является неотъемлемой частью этой сложной системы.

Следует помнить, что из ранних работ посвященных ПД (Spiro et al., 1979; Anderson et al., 1991; Karlsson et al., 1998) известно, что частота обнаружения ПД зависит от геомагнитной активности и поведение расположения ПД по широтам и долготам примерно соответствует поведению ГИП. Кроме того, все предложенные в литературе механизмы генерации ПД предполагают зависимость направленного к полюсу электрического поля E_x от плотности FAC и объема инжектированных частиц из магнитосферы. Таким образом, следует ожидать

увеличения как интенсивности ПД, так и частоты его появления во время геомагнитных бурь и, в частности, экстремальных геомагнитных бурь. Однако любая геомагнитная буря (особенно экстремальная) представляет собой комплекс сложных и взаимосвязанных нелинейных процессов. Поэтому зависимость параметров ПД от геомагнитной активности во время экстремальных геомагнитных событий может так же быть нелинейной. О нелинейности этой зависимости говорит и неожиданное обнаружение так называемых Quiet-time SAIDs — ПД геомагнитно-спокойного времени (Archer, Knudsen, 2018; Nishimura et al., 2024). Согласно (Nishimura et al., 2024) Quiet-time SAID и соответствующие им Quiet-time STEVE обнаруживаются во время практически нулевой геомагнитной активности ($SYM-H = \sim -4$ нТл, $AE = \sim 0$ нТл, $Dst = \sim 0$ нТл), что противоречит большинству известных в настоящее время теориям возникновения как ПД, так и STEVE. Исследований проявлений ПД в противоположной стороне «геомагнитного спектра» — во время нескольких экстремальных геомагнитных событий ранее не проводилось. В данной Главе рассмотрены параметры ПД во время крупнейших геомагнитных событий 21 века, а также отдельно более детально рассмотрена геомагнитная буря 10–12 мая 2024 года (Chernyshov et al., 2025a,b).

4.2 Экстремальная геомагнитная буря 10–12 мая 2024 года (Буря Победы)

Во время геомагнитной бури 10–12 мая 2024 индекс Dst достиг минимума в -412 нТл в 02 UT 11 мая 2024 года. Часто такие экстремальные геомагнитные бури, наблюдаемые на Земле, называют в честь дней, когда происходили солнечные вспышки, КВМ или максимальное воздействие на ионосферу (например, Буря на Хэллоуин 2003 года, солнечное событие в День взятия Бастилии, геомагнитная буря в День Святого Патрика 2015 года и так далее). Поэтому, следуя этой традиции, это событие мы назвали «Геомагнитная буря Дня Победы 2024 года», поскольку солнечные вспышки произошли 8–9 мая 2024 года, что привело к значительным последующим воздействиям на ионосферу Земли.

Во время Бури Победы 2024 года полярные сияния были зафиксированы в Армении, Мексике, Японии, на Кубе и в других местах, где обычно не наблюдаются полярные сияния (Gonzalez-Esparza et al., 2024; Nanjo, Shiokawa, 2024). Некоторые спутники были отключены или переведены в безопасный режим во время этого события, чтобы минимизировать последствия. Компания Starlink предупредила о «снижении качества обслуживания», поскольку Земля подвергается воздействию самой мощной геомагнитной бури за последние два десятилетия. Сообщалось о сбоях в навигационных системах, проблемах с распространением радиоволн, наведенных токах в трубопроводах, геомагнитно-индуцированных токах (ГИТ), теллурических токах, вызванных возмущениями магнитного поля, об обнаружении

геомагнитных сигналов в сейсмических данных, наряду с воздействием на здоровье людей, чувствительных к погодным условиям (Diaz, 2024), изменениям в глобальном распределении ПЭС (Lee et al., 2025) слоя F2, а также о пятикратном падении электронной концентрации в слое F2 над Иркутском (Yasyukevich et al., 2025).

В текущем разделе диссертации рассматривается экстремальная геомагнитная Буря Победы 10–12 мая 2024 года с точки зрения особенностей возникновения ПД и развития его характеристик. Как известно из предыдущих Глав диссертационной работы, ПД и его внутренняя структура может вызывать нарушения в радиосвязи и системах спутниковой навигации. Во время сильных геомагнитных возмущений граница аврорального овала и ГИП, а следовательно, и ПД (Spiro et al., 1979), сдвигаются на низкие широты, в области с высокой плотностью населения и экономической активности. Таким образом, исследование ПД во время сильных геомагнитных возмущений и, в частности, во время Бури Победы представляет не только научный, но и практический интерес. В данной Главе использован широкий набор приборов, имеющихся на научной станции Ладушкин в Калининградской области — магнитометр, ГНСС-приемник, ионозонд и камера всего неба, а также данные с ионозонда Юлиусрух. Помимо наземных применялись данные хорошо известных ионосферных спутников DMSP и Swarm на низкой орбите и данные, полученные с космического аппарата ACE (Advanced Composition Explorer), который предоставляет информацию о параметрах солнечного ветра и ММП в точке Лагранжа L1 (Smith et al., 1998; Stone et al., 1998), для детального изучения ПД во время геомагнитной бури в День Победы (9–12 мая) 2024 года.

4.2.1 Геомагнитные условия

До начала возмущений скорость солнечного ветра составляла около 350 км/с, что соответствует типичным (спокойным) условиям, как показано на Рисунке 4.1. Во второй половине 10 мая было зафиксировано резкое увеличение скорости до 700 км/с, за которым последовало постепенное увеличение скорости межпланетной плазмы, достигшее 1000 км/с 11 мая, что указывает на КВМ на Солнце. Это резкое увеличение скорости солнечного ветра совпало с внезапным повышением плотности и температуры плазмы 10 мая 2024 года. Следует отметить, что высокие колебания плотности и температуры во время сильных КВМ и связанных с ними ударных волн, особенно во время солнечного максимума, возникают из-за сжатия ударной волной, нагрева и инжекции энергии в турбулентность (Gautam et al., 2024). Скорость каскада турбулентности, выведенная как из теории Колмогорова, так и из феноменологии Ирошникова-Краичнана (Chernyshov et al., 2014), изменяется в зависимости от солнечного цикла, поскольку изменение параметров турбулентности солнечного ветра (Adhikari

et al., 2014) влияет на масштабно-инвариантные свойства и «каскад Ричардсона» (Frisch, 1995), то есть на скорость каскада энергии турбулентности, приводящую к прерывистости. Однако, в отличие от скорости, значения плотности к 12 мая 2024 года вернулись к уровням 9 мая с небольшими колебаниями, в то время как температура оставалась высокой в широком диапазоне значений (см. Рисунок 4.1). Таким образом, обнаружен фронт ударной волны, приведший к резкому увеличению плотности, температуры и скорости солнечного ветра, что вызвало самую мощную магнитную бурю на Земле в 21 веке, отразившуюся в чрезвычайно высоких значениях геомагнитных индексов.

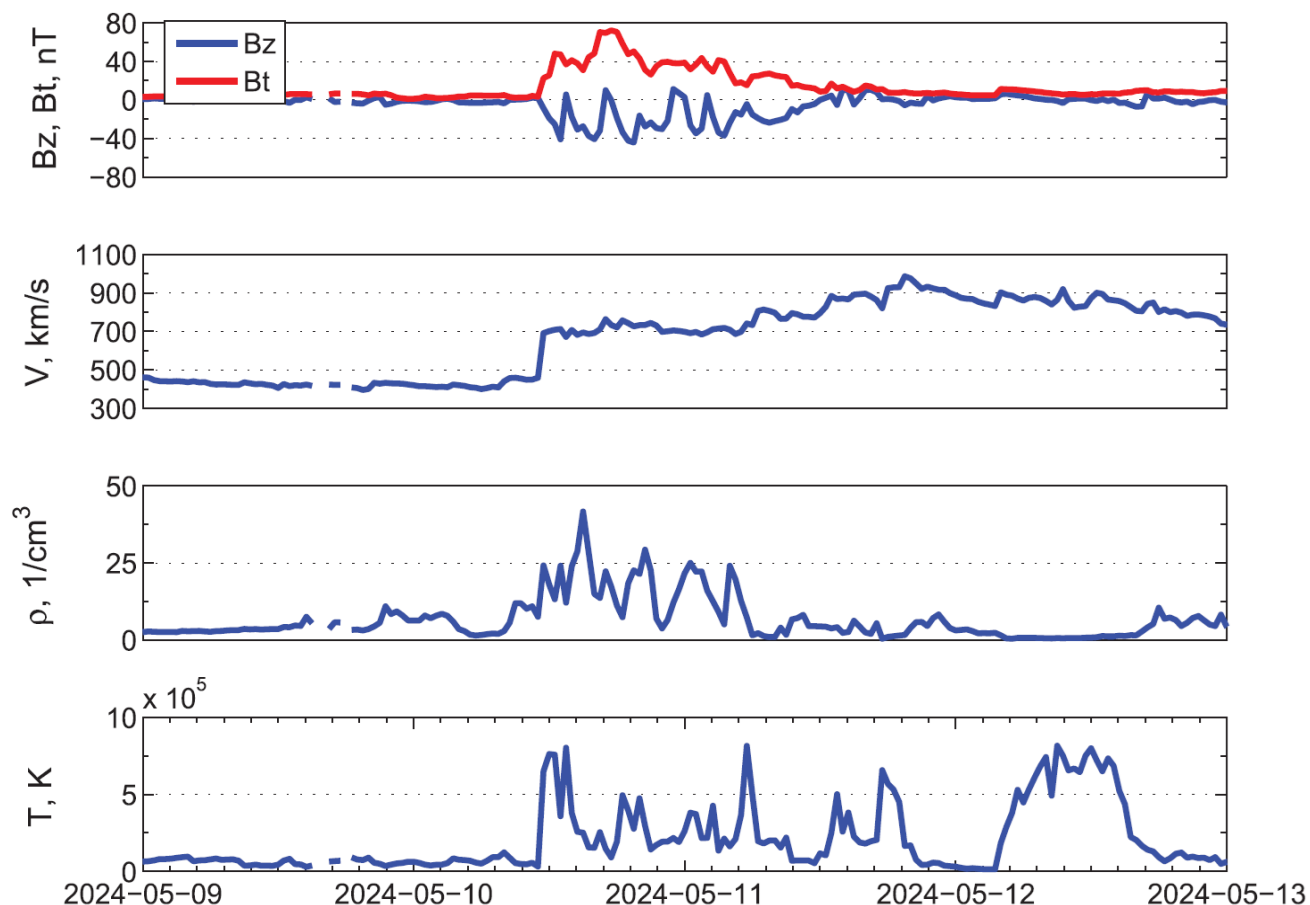


Рисунок 4.1 — Данные о солнечном ветре во время геомагнитной Дня Победы 2024 года.

Данные охватывают период с 9 по 13 мая 2024 года. Сверху вниз на панелях: межпланетное магнитное поле B_t (красная линия) и южная компонента B_z (синяя линия); скорость солнечного ветра; плотность плазмы; температура.

Данные о ММП со спутника ACE приведены на верхней панели Рисунка 4.1, где красным цветом обозначено межпланетное магнитное поле B_z , а черным — суммарное межпланетное магнитное поле B_t в системе координат GSM (Geocentric Solar Magnetic (Laundal, Richmond, 2016)). Заметно, что компонента B_z повернулась на юг около 16:40 UT 10 мая и оставалась отрицательной до конца 11 мая 2024 года, с очень короткими положительными пиками, достигая пиковых значений в -45 нТл. Одновременно интенсивность межпланетного

магнитного поля B_t увеличилась до максимального значения около -73 нТл. Когда B_z отрицательно, на дневной стороне магнитопаузы происходит магнитное пересоединение, приводящее к последующему расширению полярной шапки (Nosokawa et al., 2020) и экваториальному движению аврорального овала, как это зафиксировано различными наземными приборами. Это связано с общей динамикой системы ионосфера/магнитосфера (Paschmann et al., 2002). В ходе этого события высокая скорость солнечного ветра, ударная волна и южная компонента B_z вызвали значительное сжатие магнитосферы, что привело к усилению магнитосферных токов (значительное усиление кольцевого тока, увеличение конвекции) и активным буревым процессам. В результате этих воздействий на различных широтах наблюдались интенсивные полярные сияния, а также изменения в распределении плазмы в радиационных поясах и хвосте магнитосферы. В конечном итоге это привело к сильным эффектам в ионосфере Земли, которые описаны в этой Главе с использованием различных наземных и спутниковых приборов.

Во время геомагнитной бури в День Победы 2024 года наблюдались значительные изменения геомагнитных индексов K_p и Dst , а также индекса солнечной активности $F10.7$, как видно из Рисунка 4.2. Буря началась 10 мая около 12:00 UT с увеличением индекса K_p до 4, что указывает на начало геомагнитных возмущений. Индекс K_p измеряет глобальную геомагнитную активность на основе данных различных магнитных обсерваторий по всему миру (Matzka et al., 2021). К вечеру того же дня индекс K_p резко увеличился до 8, что указывает на сильную бурю, а затем до 9 около полуночи, как видно из Рисунка 4.2 (средняя панель). Пик активности пришелся на ночь с 10 на 11 мая 2024 года, когда значения K_p достигли 9 и оставались на этом уровне до вечера 11 мая, отражая чрезвычайно высокую геомагнитную активность и указывая на продолжающиеся бурные условия. Вечером, после 21:00 UT 11 мая 2024 года, индекс K_p начал снижаться, колеблясь между 7 и 8. К утру 12 мая индекс K_p вернулся к более типичным значениям 3–4, что указывало на окончание шторма. Высокие значения K_p свидетельствовали о расширении аврорального овала в сторону более низких широт, благодаря чему полярные сияния стали видны в регионах, где они обычно не наблюдаются.

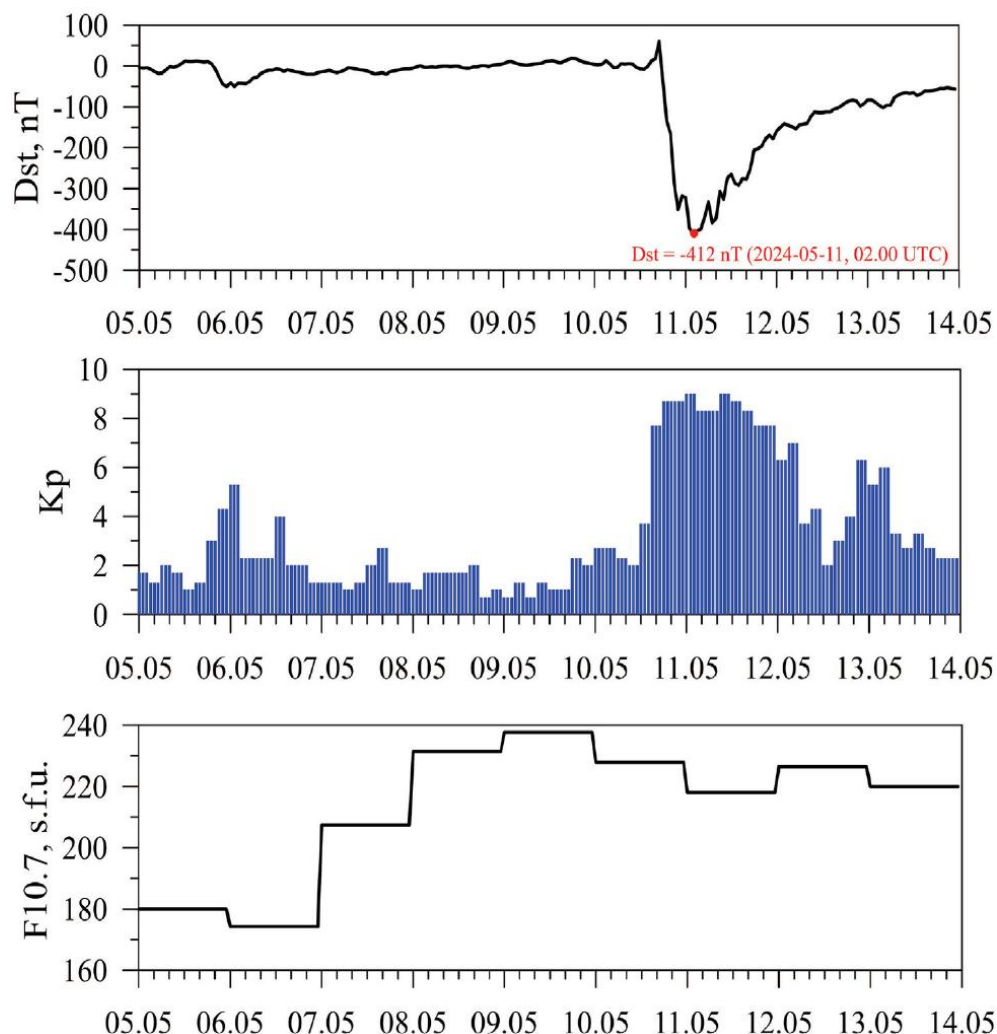


Рисунок 4.2 — Верхняя панель — динамика индекса Dst во время геомагнитного события. Средняя панель — изменения геомагнитного индекса Kp. Нижняя панель — динамика солнечного индекса F10.7.

На поверхности Земли влияние кольцевых токов, которые характеризует индекс Dst, отражается в уменьшении горизонтальной компоненты H магнитного поля, при этом максимальное уменьшение наблюдается на низких широтах. После небольшого увеличения 10 мая до 62 нТл около 18:00 UT, примерно в 19:00 UT на верхней панели Рисунка 4.2 началось резкое падение индекса Dst, достигшего минимального значения -412 нТл около 02:00–03:00 UT 11 мая, что указывает на очень сильную геомагнитную бурю. Затем индекс Dst начал медленно восстанавливаться, но значения ниже -300 нТл сохранялись до 12:00 UT 11 мая. Только к концу 12 мая индекс Dst поднялся до уровня выше -100 нТл.

Индекс F10.7 измеряет солнечный радиопоток на длине волны 10.7 см (2800 МГц) и служит индикатором солнечной активности (Tapping, 2013). Радиоизлучение F10.7 возникает высоко в хромосфере и низко в короне солнечной атмосферы. 8 мая 2024 года солнечный индекс F10.7 превысил 233 единицы солнечного потока (s.f.u. — solar flux unit), что отражает

значительно повышенную солнечную активность. Одна s.f.u. определяется как $10^{-22} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{Гц}^{-1}$. В этот период на Солнце наблюдались солнечные вспышки класса X. Как можно заключить из нижней панели Рисунка 4.2, после резкого увеличения 7 мая индекс F10.7 оставался довольно высоким (превышая 200 s.f.u.) до 18 мая 2024 года, что указывает на различные продолжающиеся солнечные процессы, такие как мощные вспышки, KBM и высокоскоростные потоки плазмы. Эффекты этой солнечной активности начали проявляться в околоземном космическом пространстве несколько дней спустя, когда плазма солнечного ветра достигла магнитосферы Земли. Следовательно, высокие значения Kp и низкие значения Dst, которые коррелируют с повышенной солнечной активностью, указывают на значительные возмущения в магнитосфере и ионосфере, приводящие к наблюдаемым эффектам, таким как полярные сияния, ПД, STEVE, сбои в навигационных сигналах, усиление сцинтилляций ГНСС и проблемы с радиосвязью (Lanzerotti et al., 1999; Hunsucker, Hargreaves, 2002).

4.2.2 Наземные наблюдения поляризованного джета

На Рисунке 4.3 показаны вариации трех компонент магнитного поля за период с 9 по 12 мая 2024 года по данным вариационной магнитной станции Западного отделения обсерватории ИЗМИРАН (станция Ладушкин). Как показано на Рисунке 4.3, с 9 мая по 17:30 UT 10 мая значительных вариаций во всех компонентах магнитного поля не наблюдается, что коррелирует с данными о солнечном ветре. В целом, с 17:30 UT 10 мая по 06 UT 12 мая изменчивость всех компонент увеличилась. С 17:30 до 18 UT 10 мая в H-компоненте образовался положительный провал, а в D-компоненте — отрицательный, что указывает на фазу роста геомагнитной бури. В вариациях Z-компоненты магнитного поля значительная положительная бухта появляется в период с 21 UT 10 мая до 01 UT 11 мая 2024 года. С 18 до 22 UT 10 мая наблюдаются положительные бухты в компонентах H и D, что указывает на появление/усиление восточного полярного сияния в рассматриваемом регионе. Поскольку для ПД характерен пик изменения горизонтальной компоненты магнитного поля Земли (δB_H) (Степанов и др., 2017), следует ожидать наибольшую вероятность обнаружить ПД во время рассматриваемой бури именно в этом временном промежутке.

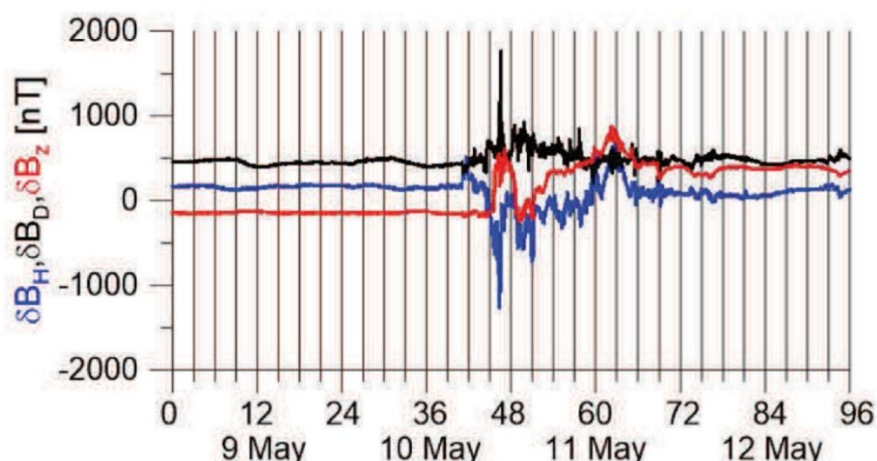


Рисунок 4.3 — Изменения H-, D- и Z-компонент магнитного поля над Калининградской областью с 9 по 12 мая 2024 года.

Камера всего неба и расположенная на магнито-ионосферной обсерватории Ладушкин, зафиксировала высокоинтенсивные оптические свечения во время геомагнитной бури 10–12 мая 2024 года. Первое яркое полярное сияние на фоне заката было зафиксировано в 19:48 UT. В период с 19:48 до 21:00 UT в северном направлении от зенита камеры наблюдалось преимущественно красно-розовое свечение. Стоит отметить резкое увеличение интенсивности яркости полярного сияния с 20:04 UT. На Рисунке 4.4а–с показаны конфигурации полярного сияния в первый час наблюдения, состоящие из локального свечения высокой интенсивности, предположительно STEVE, в северной области, а также SAR-дуги в южной области наблюдения. Яркость достигает своего максимума с 20:21 до 20:35 UT.

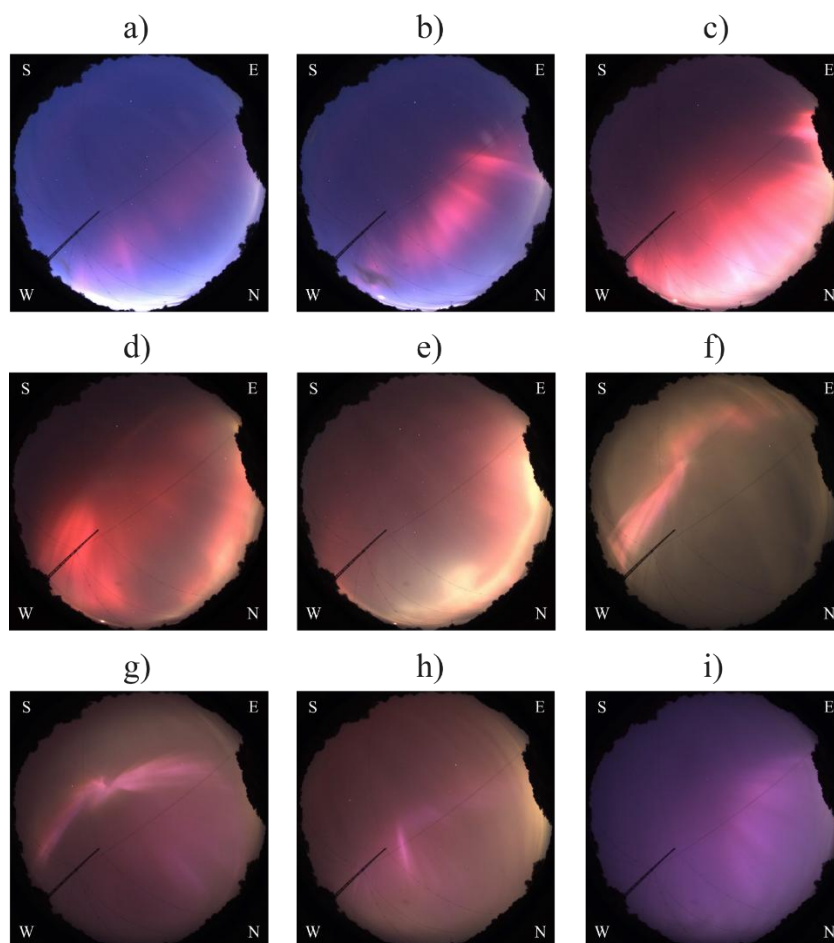


Рисунок 4.4 — Свечения, зафиксированное камерой всего неба в ночь с 10 на 11 мая в 20:02 (a), 20:07 (b), 20:22 (c), 20:33 (d), 20:45 (e), 22:11 (f), 22:44 (g), 23:19 (h), 1:09 (i) UT в обсерватории Ладушкин.

С 20:26 UT свечение преимущественно красное, полностью заполняющее северную область и распространяющееся через зенит на южную сторону поля зрения камеры. Также заметно наличие зеленого полярного сияния на Рисунке 4.4с (которое выглядит белым из-за цветопередачи камеры). Максимальная яркость красного и фиолетового свечения была зафиксирована в 22:11 UT (Рисунок 4.4f), несмотря на появление облаков и ухудшение видимости. В период с 22:15 до 22:44 UT наблюдались локальные фиолетовые свечения (Рисунок 4.4g). С 23:00 UT происходит постепенное смещение максимума полярного сияния из южной части поля зрения в северную. Во время этого смещения образуются яркие вспышки розового и фиолетового излучения, предположительно, от STEVE (Рисунок 4.4h). С этого момента яркость свечения уменьшалась на фоне утреннего освещения и облачности (Рисунок 4.4i). Последнее изображение с полярным сиянием было записано в 01:24 UT перед восходом солнца на Земле, который в тот день был в 02:41 UT. Общая продолжительность полярных сияний в ночь с 10 на 11 мая составила около 5.5 часов.

В ночь с 11 на 12 мая также наблюдалось свечение на фоне ясного безоблачного неба. В 20:26 UT на фоне заката в северной части поля зрения камеры появилось слабое фиолетовое свечение. Резкое увеличение интенсивности полярного сияния наблюдается с 20:41 UT. Максимальная интенсивность была зафиксирована в 20:49 UT (Рисунок 4.5). С 20:51 UT наблюдается снижение интенсивности свечения. Непрерывное свечение в северной части полушария сменяется очаговыми полярными сияниями. На горизонте наблюдались три источника фиолетового полярного сияния, зафиксированные в периоды 21:04–21:07, 21:09–21:15 и 21:16–21:23 UT. Эти источники переместились из северо-восточной части в северо-западную, что является дополнительным фактором, указывающим на то, что это свечение является STEVE (Parnikov et al., 2022). С 23:20 UT полярное сияние не наблюдалось. Следует отметить, что в эту ночь было зафиксировано только фиолетовое свечение. Общая продолжительность полярных сияний 11–12 мая 2024 года составила около 4 часов. Поскольку STEVE связан с ПД (MacDonald et al., 2018), его присутствие на исследуемых широтах подтверждает наличие ПД в этих регионах.

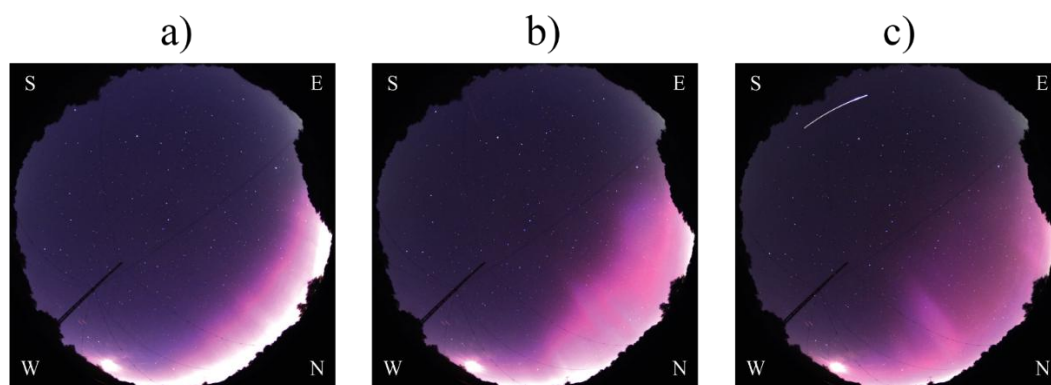


Рисунок 4.5 — Свечения, зафиксированные камерой всего неба в ночь с 11 на 12 мая в 20:45 (a), 20:49 (b), 20:53 (c) UT в обсерватории Ладушкин. На панели (c) также виден пролет Международной космической станции (МКС).

Далее рассмотрены ионограммы ионозонда в Ладушкине в моменты наблюдения авроральных сияний и ПД/STEVE над станцией. На верхней панели Рисунке 4.6 показаны начальные проявления геомагнитной бури, зарегистрированные как камерой всего неба, так и ионозондом Парус-А в 20:00 UT 10 мая 2024 года. На изображении с камеры наблюдается яркое свечение с выраженным максимумом на фоне заходящего солнца. В то же время данные Парус-А указывают на дополнительный след в F-области, имеющий вид правой половины буквы U примерно на 150–200 км выше обычного вертикального следа в это время. Аналогичный дополнительный след с северного направления наблюдался на ионограмме ионозонда DPS-4 в Юлиусрухе, как следует из левой панели Рисунка 4.7. Такие следы ранее наблюдались внутри ПД на ионограммах Юлиусрух (Рисунок 3.18) в третьей Главе диссертационной работы.

Перечисленные выше характерные признаки на изображениях с камеры и на ионограммах указывают на наличие ПД (Stepanov et al., 2019a) и STEVE (Parnikov et al., 2022).

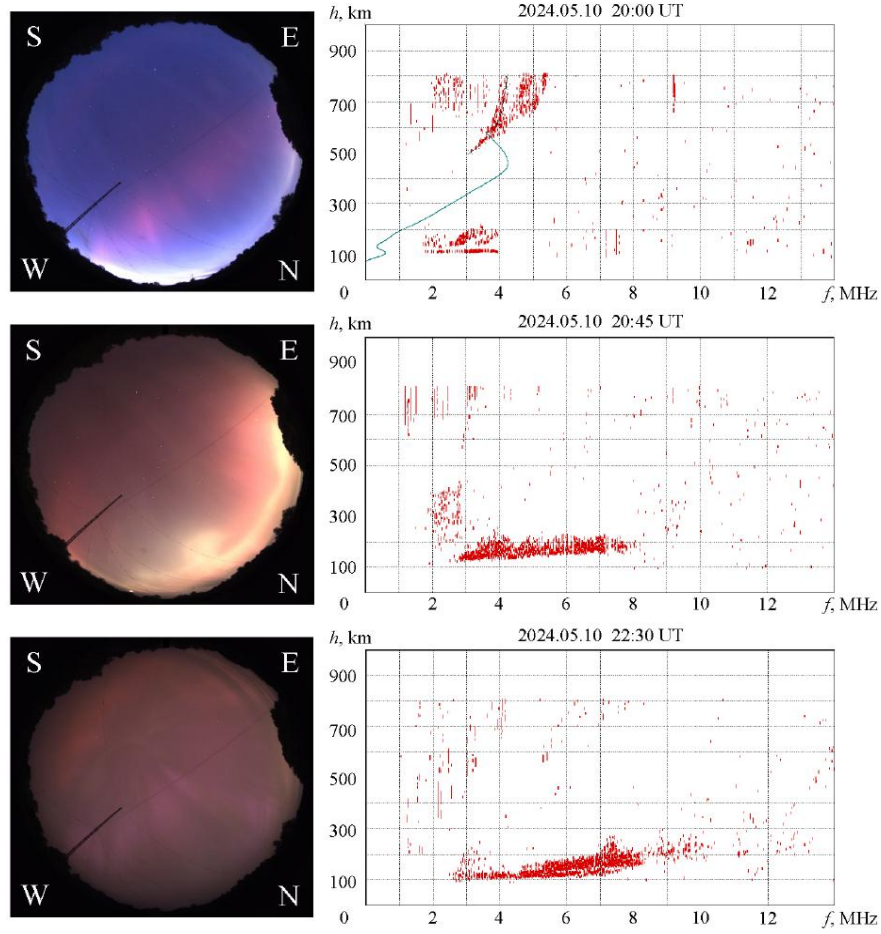


Рисунок 4.6 — Изображения с камеры всего неба (левая панель) и ионограммы (правая панель) с ионозонда Парус-А обсерватории Ладушкин в 20:00, 20:45 и 22:30 UT 10 мая 2024 года. Бирюзовая линия соответствует профилю плазменной частоты, полученному в результате обработки ионограммы за 20:30 UT.

Таким образом, согласно записям камеры и измерениям ионозонда, с 20:00 до 20:03 UT над Калининградской областью наблюдались признаки ПД и STEVE к северо-западу от места наблюдения, при этом STEVE двигался на запад. В этот период данные ГНСС-приемника также указывали на увеличение ROTI, достигающее пика к северу от обсерватории Ладушкин (левый столбец Рисунка 4.8), что указывает на то, что провал электронной концентрации, связанный с ПД, располагался к северу от Юлиусруха и Калининграда. Индекс ROTI представляет собой среднеквадратичное отклонение от ROT (Rate of change of TEC, быстрота изменения ПЭС), позволяющее идентифицировать мелкомасштабные неоднородности в ПЭС (Pi et al., 1997):

$$ROTI = \sqrt{\langle ROT^2 \rangle - \langle ROT \rangle^2}, \quad (61)$$

где ROT (Wanninger, 1993):

$$ROT = TEC(t_2) - TEC(t_1). \quad (62)$$

Ионограммы на Рисунке 4.6 показали стратификацию Е-области. Были зарегистрированы отражения как спорадического слоя Es аврорального типа, так и более низкого, дополнительного следа. Дополнительный след на ионограмме появился на высоте 106.5 км, с частотами сигнала от 1.75 до 3.93 МГц. Присутствие спорадического аврорального Es-слоя является характерным для ПД, поскольку вызывается вспышкой авроральной активности (Сивцева и др., 1983). Как видно из левой панели Рисунка 4.7, данные DPS-4 показали аналогичную траекторию отражения, исходящую из северо-северо-восточного (NNE) направления, в том же частотном диапазоне.

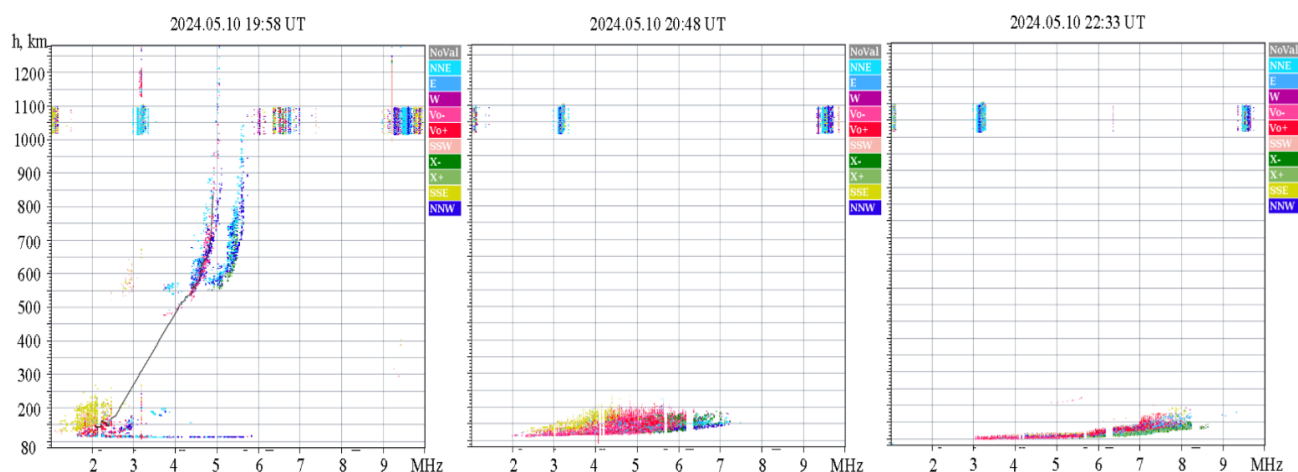


Рисунок 4.7 — Ионограммы, полученные ионозондом DPS-4 в Юлиусрух в 19:58 (левая панель), 20:48 (центральная панель) и 22:33 UT (правая панель) 10 мая 2024 года. Сплошная черная линия показывает обработанный след обыкновенной моды вертикально отраженного радиосигнала в 19:58 UT.

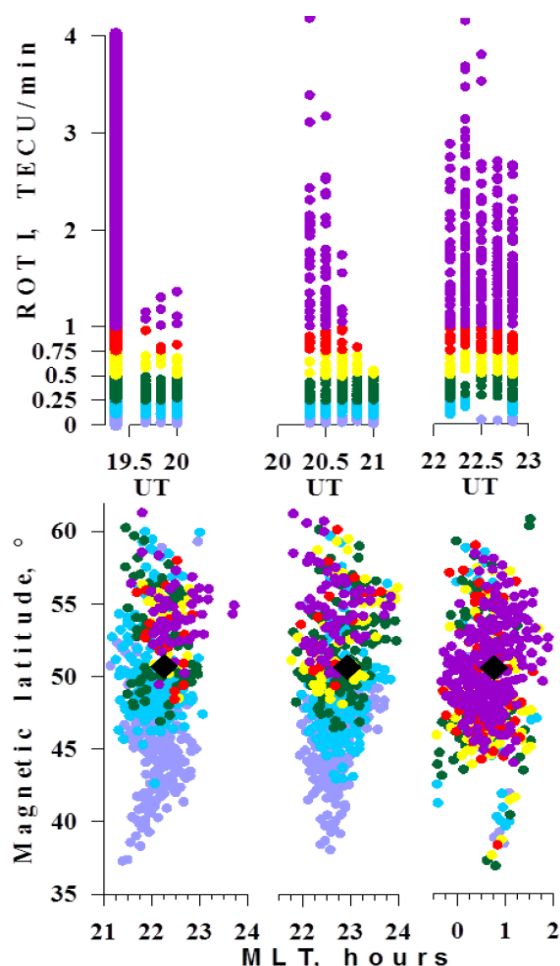


Рисунок 4.8 — Значения ROTI для 21 станции, расположенной между 50° – 61° с.ш. и 15° – 26° в.д. в течение трех интервалов 10 мая 2024 года: 19:40–20:20 (левый столбец), 20:20–21:00 (центральный столбец), 22:10–22:50 UT (правый столбец). Цветовая шкала, указывающая на изменения ROTI, отображается на верхней панели. На нижней панели показаны значения ROTI в координатах MLT, местоположение обсерватории Ладушкин выделено черным ромбом.

4.2.3 Спутниковые наблюдения поляризационного джета

На Рисунке 4.9 представлены три периода времени, когда приборы SSUSI на спутниках DMSP F-17 и F-18 измеряли мощности УФ-излучения в диапазоне LBHL в ионосфере северного полушария вблизи станции Ладушкин. Положение ионосферной станции Ладушкин отмечено красной звездочкой на всех панелях рисунка. Первая пара пролетов (Рисунок 4.9a,d) соответствует времени измерения авроральных сияний спутниками 10 мая 2024 года, приблизительно в 18:45 UT. Из этих панелей видно, что разница во времени между пролетами двух спутников составляет около 5 минут, что указывает на то, что спутники пролетают один за другим. Поскольку возмущения начались около 17:10 UT, во время предыдущего пролета (не показан) сияния на полярных широтах были слабыми, а экваториальные границы аврорального

овала находились значительно севернее Калининградской области. Однако эти пролеты происходят вскоре после начала геомагнитной активности, зарегистрированной наземным магнитометром в Ладушкине. Измерения, проведенные с помощью DMSP F-17, показывают, что станция расположена приблизительно на экваториальной границе аврорального овала, что означает, что авроральный овал еще не достиг широты Калининграда, и возможно, что в данный момент станция находится внутри ГИП вблизи ПД/STEVE. Вторая пара снимков (Рисунок 4.9b,e) показывает измерения SSUSI на следующий день приблизительно в 03:15 UT. До этого наблюдался всплеск активности до 01 UT, за которым последовало небольшое снижение. Как видно на рисунках, станция Ладушкин снова расположена чуть южнее экваториальной границы аврорального овала. Таким образом, станция наблюдает эффекты отступления аврорального овала к полюсу и должна находиться внутри ГИП. Третья пара снимков (Рисунок 4.9c,f) показывает последующие пересечения северной полярной шапки спутниками DMSP. Эти панели показывают, что авроральный овал сместился еще дальше к полюсу от станции Ладушкин. Важно отметить, что в текущем анализе данные SSUSI, по сути, дополняют локальные наблюдения с помощью камеры всего неба в другое время, поскольку во время полетов спутников DMSP в этом регионе камера не работала из-за освещения неба (пролеты спутников происходили в вечерние и утренние часы MLT).

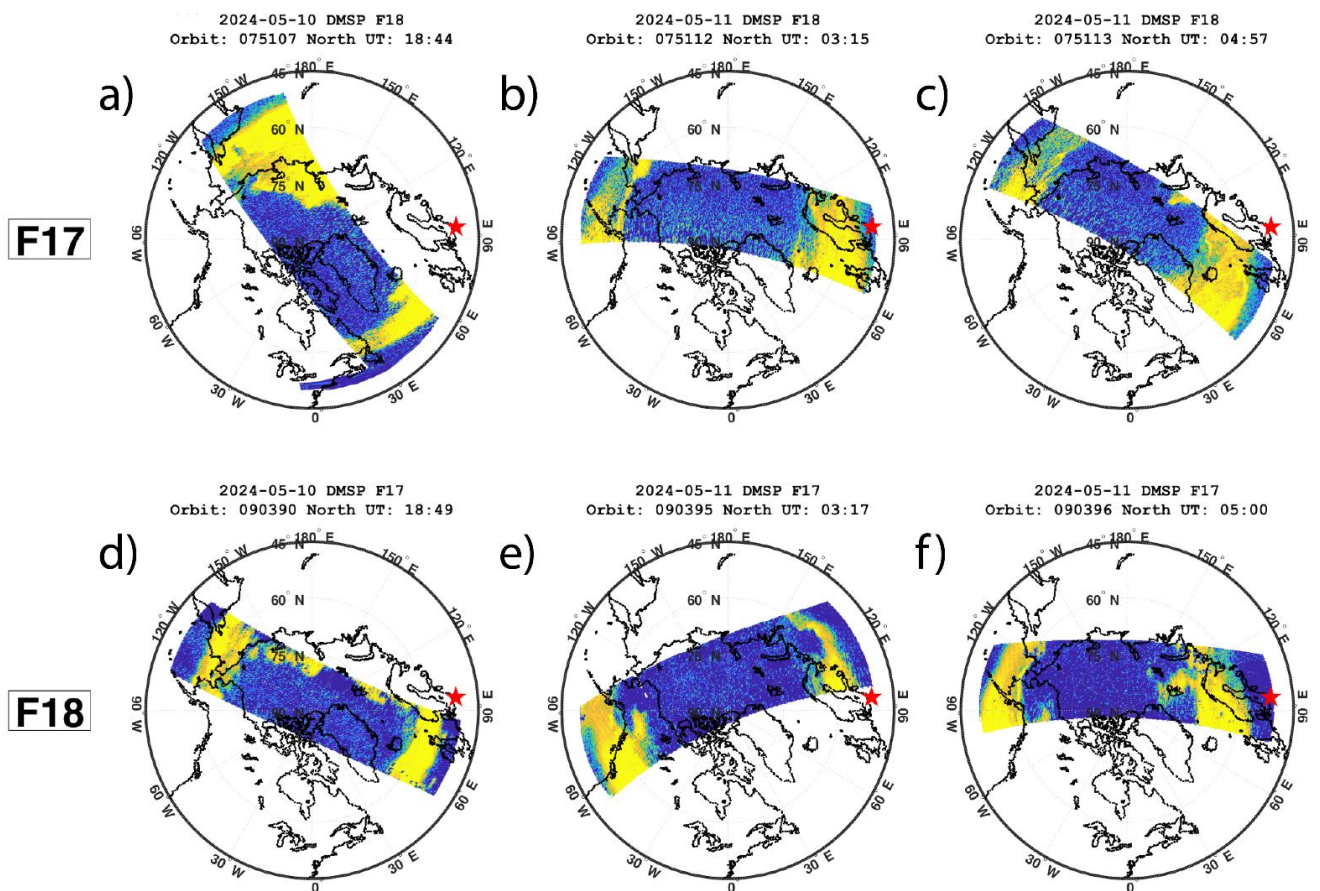


Рисунок 4.9 — УФ-снимки (LBHL), полученные с помощью прибора SSUSI на борту спутников DMSP F-17 (панели а–с) и DMSP F-18 (панели d–f) в 18:00 UT 10 мая 2024 года, 03:00 UT 11

мая 2024 года и 05:00 UT 11 мая 2024 года, в координатах AACGM. Местоположение обсерватории Ладушкин отмечено красной звездой.

Как было сказано ранее, вместо анализа крупномасштабных характеристик всех измеренных параметров ионосферной плазмы спутниками Swarm и DMSP на протяжении всей Бури Победы, в этом разделе сделан акцент на явлениях, наблюдавшихся над Калининградской областью, где проводились наземные измерения. На верхней панели Рисунка 4.10 показаны результаты измерений спутника Swarm В в северном полушарии в ~ 22 MLT ($\sim 20:00$ UT) 10 мая 2024 года. Провал электронной концентрации шириной $\sim 1.25^\circ$ расположен между геомагнитными широтами $\sim 44.75^\circ$ и $\sim 46^\circ$ и частично совпадает с повышением электронной температуры, которое примерно на 0.75° шире в экваториальном направлении (44° – 46°) и состоит из двух пиков на геомагнитных широтах $\sim 45.5^\circ$ и $\sim 44.75^\circ$, оба шириной приблизительно 0.5° . В соответствии с вышеупомянутыми особенностями, наиболее вероятно, что этот провал электронной концентрации вызван ПД. Следует отметить, что геомагнитная широта $\sim 45^\circ$ не типична для ПД; типичное местоположение ПД находится в пределах интервалов геомагнитной широты 55° – 70° (Spiro et al., 1979) или 50° – 65° (Karlsson et al., 1998). Расположение рассматриваемого ПД так близко к экватору обусловлено чрезвычайно высоким уровнем геомагнитной активности во время Бури Победы. Поскольку ПД обычно располагается рядом с внешним краем ионосферной проекции плазмопаузы вблизи экваториальной границы авроральной области, интенсивная геомагнитная активность приводит к значительному смещению местоположения проекции плазмопаузы ближе к экватору. Нужно обратить внимание, что провал электронной концентрации состоит из двух провалов на геомагнитных широтах $\sim 45.25^\circ$ и $\sim 45.75^\circ$, которые не так заметны, как пики электронной температуры, и пространственно не совпадают с ними, но тем не менее, имеют приблизительно одинаковую ширину ($\sim 0.5^\circ$). Эти провалы электронной концентрации и повышения электронной температуры, вероятно, представляют собой крупные страты ПД, а рассматриваемый ПД является СПД. Как известно из второй Главы диссертационной работы, страты электронной концентрации и электронной температуры не всегда пространственно совпадают. Следует также отметить, что спутник пролетел вдоль долготы Калининградской области ($\sim 20^\circ$ в.д.), а географические широты 49° – 51° близки к географической широте обсерватории Ладушкин.

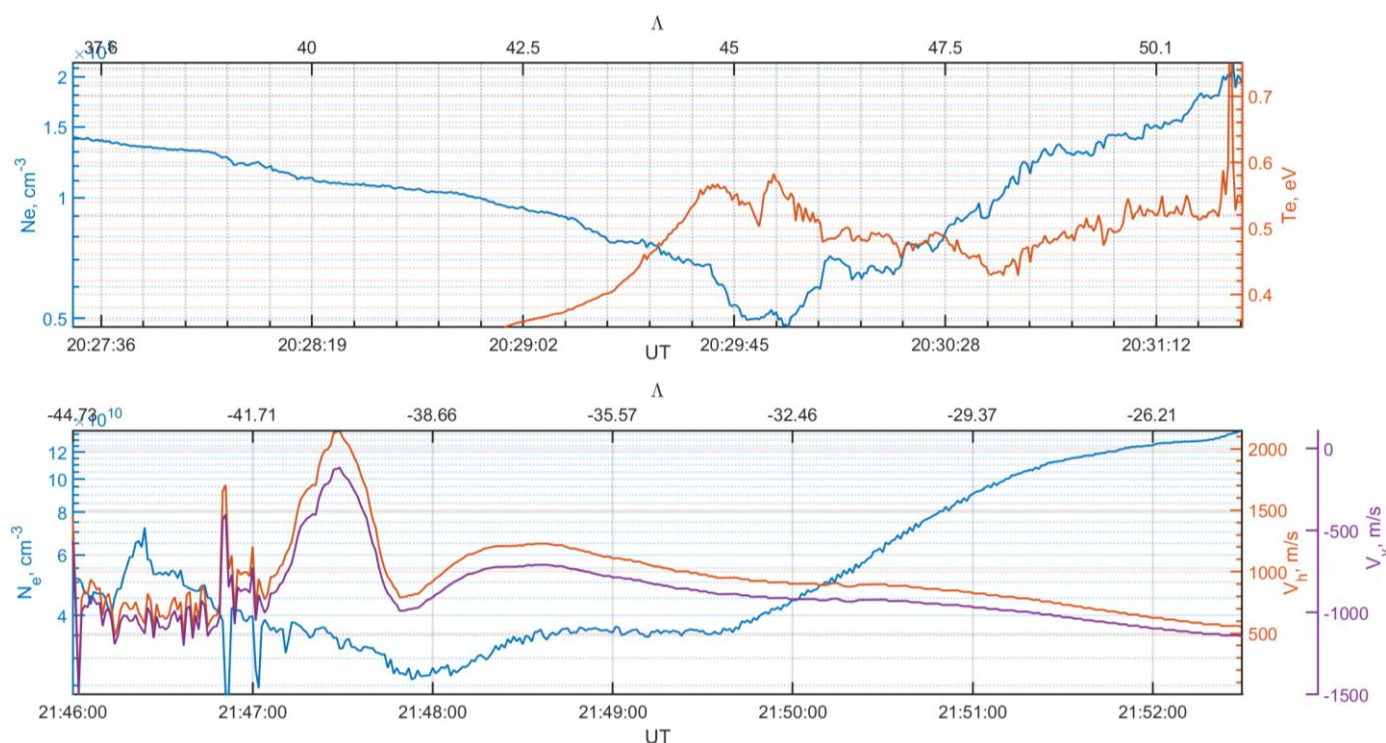


Рисунок 4.10 — Верхняя панель — Динамика концентрации электронов (синяя линия, ось Y слева) и температуры электронов (красная линия, ось Y справа), измеренные спутником Swarm B в секторе ~ 22 MLT и в $\sim 20:30$ UT 10 мая 2024 года. Нижняя панель — Динамика горизонтальной (красная линия, ось Y справа) и вертикальной (фиолетовая линия, ось Y справа) скоростей дрейфа ионов, концентрации электронов (синяя линия, ось Y слева) согласно данным DMSP F-16 в секторе ~ 18 MLT и в $\sim 21:00$ UT 10 мая 2024 года. По верхней оси абсцисс отложена геомагнитная широта AACGM, а по нижней — время UT.

На нижней панели Рисунка 4.10 показаны данные со спутника DMSP F-16 в южном полушарии в ~ 18 MLT и ~ 21 UT 10 мая 2024 года. Данные дрейфметра на борту DMSP F-16 (горизонтальная и вертикальная скорости дрейфа ионов) явно указывают на наличие полосы ПД шириной $\sim 1.5^\circ$ на геомагнитных широтах -41° и -39° , а скорость дрейфа ионов в западном и восходящем направлениях в полосе ПД достигает ~ 2100 м/с и ~ 750 м/с соответственно. Поскольку наличие ПД в южном полушарии подтверждает наличие ПД в северном полушарии и наоборот (Anderson et al., 1991; Burke et al., 2000), а ПД обычно растянут вдоль широты как минимум от 16 до 02 MLT (Karlsson et al., 1998; Burke et al., 2000), пик горизонтальной и вертикальной скорости дрейфа ионов около 18 MLT в южном полушарии вблизи геомагнитной широты -40° дополнительно подтверждает присутствие ПД около 22 MLT в северном полушарии на магнитно-сопряженной геомагнитной широте 45° .

Таким образом, спутниковые данные согласуются с наземными измерениями. Согласно спутниковым данным, на начальной фазе экстремальной геомагнитной бури 10 мая 2024 года развивается ПД. Также из спутниковых данных видно, что далее в процессе буревой активности

авроральный овал сместился к геомагнитному экватору, и поэтому обсерватория Ладушкин оказалась в авроральной зоне и не могла фиксировать ПД. Интересно отметить, что в максимуме геомагнитной активности ПД не регистрировался в отличие от основной и фазы восстановления. Это, скорее всего, 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.

4.3 Поляризационный джет во время других экстремальных геомагнитных бурь

4.3.1 Метод определения параметров поляризационного джета

В предыдущем разделе подробно рассмотрена субавроральная область ионосферы, включая параметры ПД, во время одной из экстремальных геомагнитных бурь — Бури Победы 2024 года. В текущем разделе помимо Бури Победы рассмотрен ряд других экстремальных геомагнитных событий 21 века для сравнения параметров ПД и для анализа эволюции ПД во время экстремальных геомагнитных событий в целом.

Такое исследование предполагает анализ большого объема данных измерений горизонтальных скоростей дрейфа ионов. Определение положения ПД и его параметров вручную в таком случае может как занять большое количество времени, так и значительно повлиять на точность и достоверность результатов. Для того, чтобы избежать ручной обработки, был создан алгоритм полуавтоматической обработки данных и определения параметров ПД (пример его использования показан на Рисунке 4.11), который анализирует данные DMSP следующим образом: оператор выбирает положения левой и правой границ разметки (красная область), затем алгоритм ищет пиковое значение скорости горизонтального дрейфа ионов внутри этой области. После этого алгоритм ищет левую и правую точки на половине пиковой скорости и вычисляет полную ширину на половине амплитуды (FWHM, full width at half magnitude, полуширина), а затем возвращает ряд параметров: полуширину, пиковую скорость горизонтального дрейфа ионов (PeakV), среднюю скорость горизонтального дрейфа ионов в интервале между левой и правой точками на половине амплитуды (AvgV), широты этих точек и MLT. Этот алгоритм минимизирует влияние оператора на результат определения характеристик, поскольку он опирается на пиковое значение скорости горизонтального дрейфа ионов в выбранном интервале, а не на сам интервал.

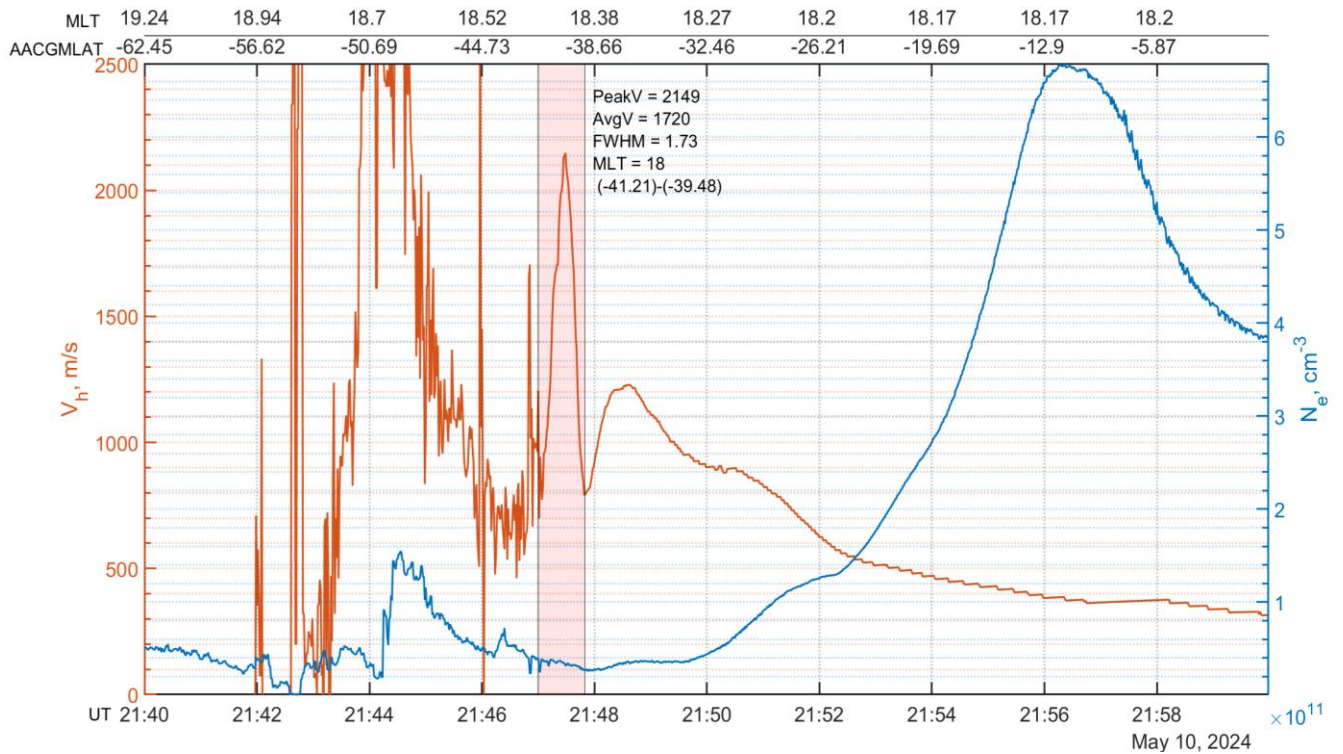


Рисунок 4.11 — Пример использования метода измерения характеристик ПД во время Бури Победы 10–12 мая 2024 года в 21:00 UT 10 мая 2024 года. Синяя линия показывает концентрацию электронов, красная линия — горизонтальную скорость дрейфа ионов, измеренные DMSP F-16 и построенные относительно UT, MLT и геомагнитных широт AACGM. Красный прямоугольник показывает предполагаемый интервал ПД. Текст над прямоугольником — параметры ПД, рассчитанные алгоритмом.

Широты, показанные в примере на Рисунке 4.11, уже были рассмотрены в предыдущем разделе (Рисунок 4.10), и представляют один из пролётов спутника DMSP F-16 через субавроральные широты во время Бури Победы 10–12 мая 2024 года в 21:42–22:00 UT. Эти широты были выбраны для демонстрации работы алгоритма, поскольку ПД присутствовал во время рассматриваемого пролета. Этот временной интервал соответствует основной фазе бури, при этом $Dst = -157$ нТл и $AE = \sim 1000$ нТл. Спутник летел от южного полюса к экватору. Геомагнитная активность во время основной фазы этой экстремальной геомагнитной бури сместила экваториальную границу аврорального овала на 47° геомагнитной широты в 21:00 UT в вечернем секторе местного времени (~ 18 MLT) в южном полушарии. Флуктуации электронной концентрации связаны с высыпанием частиц из магнитосферы (Jones, Rees, 1973; Roble, Rees, 1977) и горизонтальными ионными дрейфами, связанными с током Холла в области конвекции (Schunk, Walker, 1972; St.-Maurice, Schunk, 1979) на Рисунке 4.11, ограничены геомагнитной широтой $\sim 47^\circ$, что подтверждает расположение экваториальной границы аврорального овала на этой широте. Экваториальнее этой границы в секторе 18 MLT у полярной границы ГИП располагается ПД, согласно алгоритму, в диапазоне геомагнитных

широт от -41.21° до -39.48° . Его пиковая и средняя скорость составляют 2149 м/с и 1720 м/с соответственно, а его полуширина — 1.73° .

Описанным выше алгоритмом были обработаны данные измерений спутниками DMSP F-14 и DMSP F-16 горизонтальных скоростей дрейфа ионов во время сильнейших геомагнитных событий 21 века: Буря на Хэллоуин 29–30 октября 2003 года, Ноябрьская буря 20 ноября 2003 года, Буря Святого Патрика 17 марта 2015 года, Буря Победы 10–12 мая 2024 года, Октябрьская буря 10–12 октября 2024 года, а также во время умеренного геомагнитного возмущения 19–21 апреля 2018 года для сравнения параметров ПД во время умеренных и экстремальных геомагнитных событий. Рассчитанные параметры ПД в вечерних секторах MLT, построенные относительно времени UT и на фоне графиков геомагнитных индексов Dst и AE приведены на Рисунке 4.12. Пиковая скорость горизонтального дрейфа ионов внутри ПД отмечена на рисунке красными кругами, а полуширина полосы ПД — фиолетовыми квадратами.

4.3.2 Сравнение параметров поляризационного джета во время экстремальных бурь

«Буря на Хэллоуин» (или «Хэллоуинская буря») является одной из первых мощных, хорошо задокументированных и широко обсуждаемых геомагнитных событий 21 века. В работе (Mannucci et al., 2005) рассматривалась зависимость вертикального ПЭС, измеренного наземными GPS-приемниками, и вертикального ПЭС, измеренного GPS-приемником на спутнике CHAMP (от высоты орбиты спутников GPS до высоты орбиты спутника CHAMP — 400 км), от межпланетного электрического поля по данным спутника ACE во время Бури на Хэллоуин 29–30 октября 2003 года. Авторы обнаружили резкое увеличение ПЭС вследствие подъема плазмы, что является одним из наиболее заметных последствий мощных геомагнитных бурь. Дневное межпланетное электрическое поле, направленное на восток, поднимает плазму низких широт вверх за счет $E \times B$ дрейфа. Таким образом больше плазмы находится на больших высотах, где скорость рекомбинации меньше, в то время как дополнительная плазма продолжает генерироваться солнечным светом, что приводит к общему увеличению количества электронов выше 400 км, что согласуется с данными CHAMP. Авторы (Tsurutani et al., 2004) называют этот процесс «дневной суперфонтан-эффект». В статье (Sahai et al., 2009) была исследована ионосфера F-слоя в Южноамериканском секторе во время Хэллоуинской бури с использованием широкого набора инструментов. Исследование показало, что экваториальные плазменные бабблы во время этой бури достигают 33° геомагнитной широты.

Несмотря на большое количество работ, посвященных исследованию Бури на Хэллоуин 29–30 октября 2003 года и ее влияния на ионосферу Земли, ПД во время нее в научной

литературе ранее не рассматривался. На Рисунке 4.12а представлены измерения скоростей горизонтального дрейфа ионов внутри полос ПД и их полуширина по данным спутника DMSP F-14 во время Бури на Хэллоуин. Красная и синяя линии показывают геомагнитные индексы Dst и AE соответственно. По индексу Dst видно, что буря состояла из двух частей: с ~06 UT 29 октября по ~17 UT 30 октября с минимумом Dst = -353 нТл около 00 UT 30 октября и с ~17 UT 30 октября по ~18 UT 31 октября с минимумом Dst = -383 нТл. Это согласуется с результатами (Mannucci et al., 2005), где утверждается, что Хэллоуинская буря вызвана столкновением с Землей ударных волн двух последовательных КВМ, вызванных солнечными вспышками X-класса 28 и 29 октября 2003 года. В первой части геомагнитной Бури на Хэллоуин в промежутке от 12 до 00 UT 29 октября во время основной фазы регистрируется пять случаев обнаружения ПД и еще один случай в локальном минимуме Dst с относительно невысокой для ПД скоростью дрейфа (1–1.5 км/с), при этом полуширина этого ПД больше, чем средняя ширина ПД — 2°–3°. Интересно отметить, что все времена обнаружения ПД соответствуют более низким значениям аврорального индекса AE (500–1000 нТл), чем во времена до и после обнаружения (2000–3500 нТл). Во время фазы восстановления первой части бури индекс AE падает до ~100 нТл и остается на этом уровне до ~12 UT 30 октября, после чего начинает расти. Все это время ПД не наблюдается. В момент повышения AE до 1500–2000 нТл около 15–18 UT 30 октября ПД снова возникает со скоростями в 1434 м/с и 1124 м/с и полушириной ~2°. Далее в основной фазе второй части бури после прихода к Земле ударной волны второго КВМ ПД вплоть до глобального минимума Dst = -383 нТл в ~18 UT 31 октября не проявляется, однако он снова возникает на фазе восстановления второй части Хэллоуинской бури.

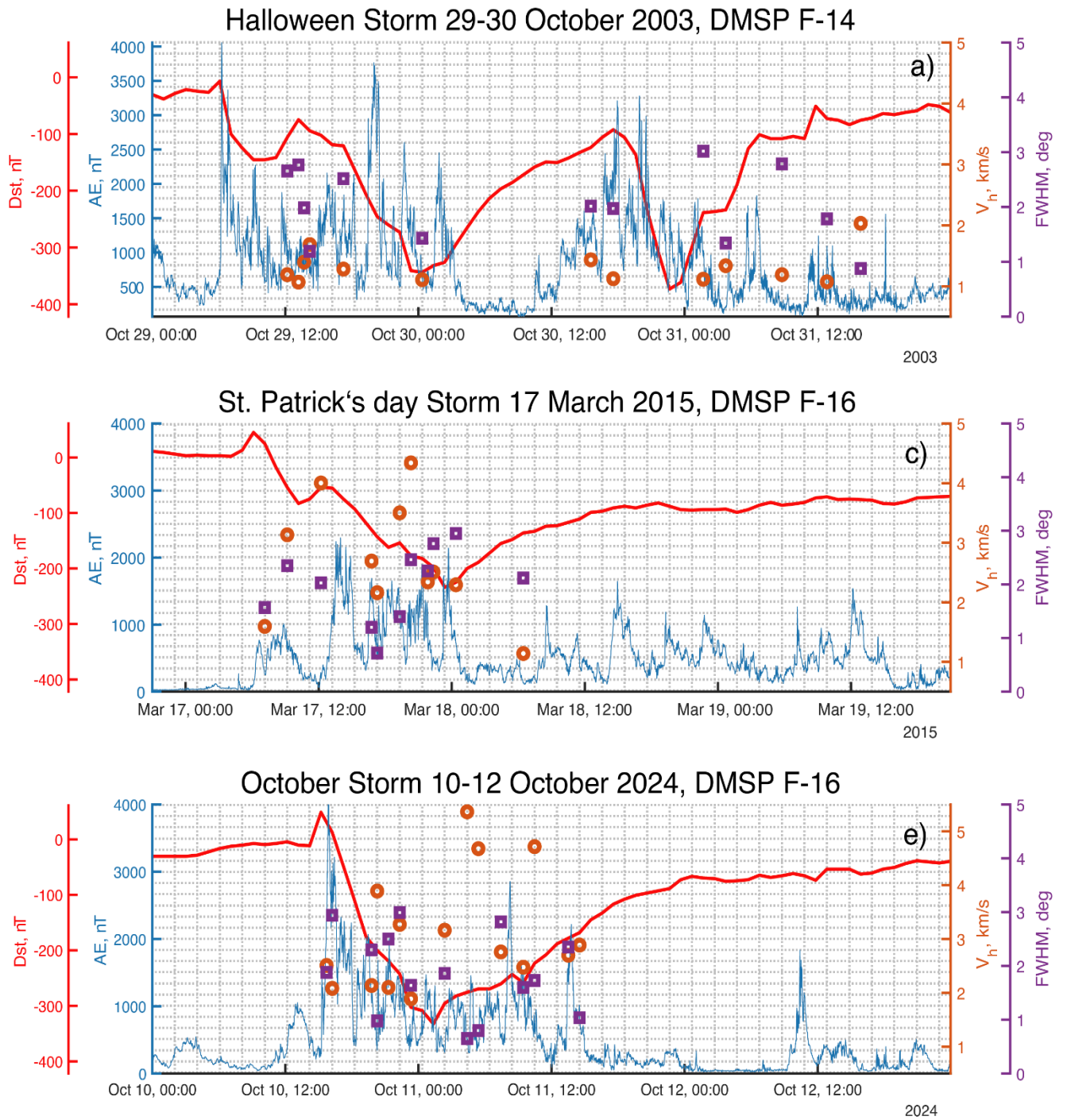


Рисунок 4.12а,с,е — Пиковая скорость горизонтального дрейфа ионов внутри ПД (красные круги) и полуширина ПД (фиолетовые квадраты) во время экстремальных геомагнитных бурь: Буря на Хэллоуин 29–30 октября 2003 года (а), Буря Святого Патрика 17 марта 2015 года (с) и Октябрьская буря 10–12 октября 2024 года (е), относительно геомагнитных индексов Dst и AE.

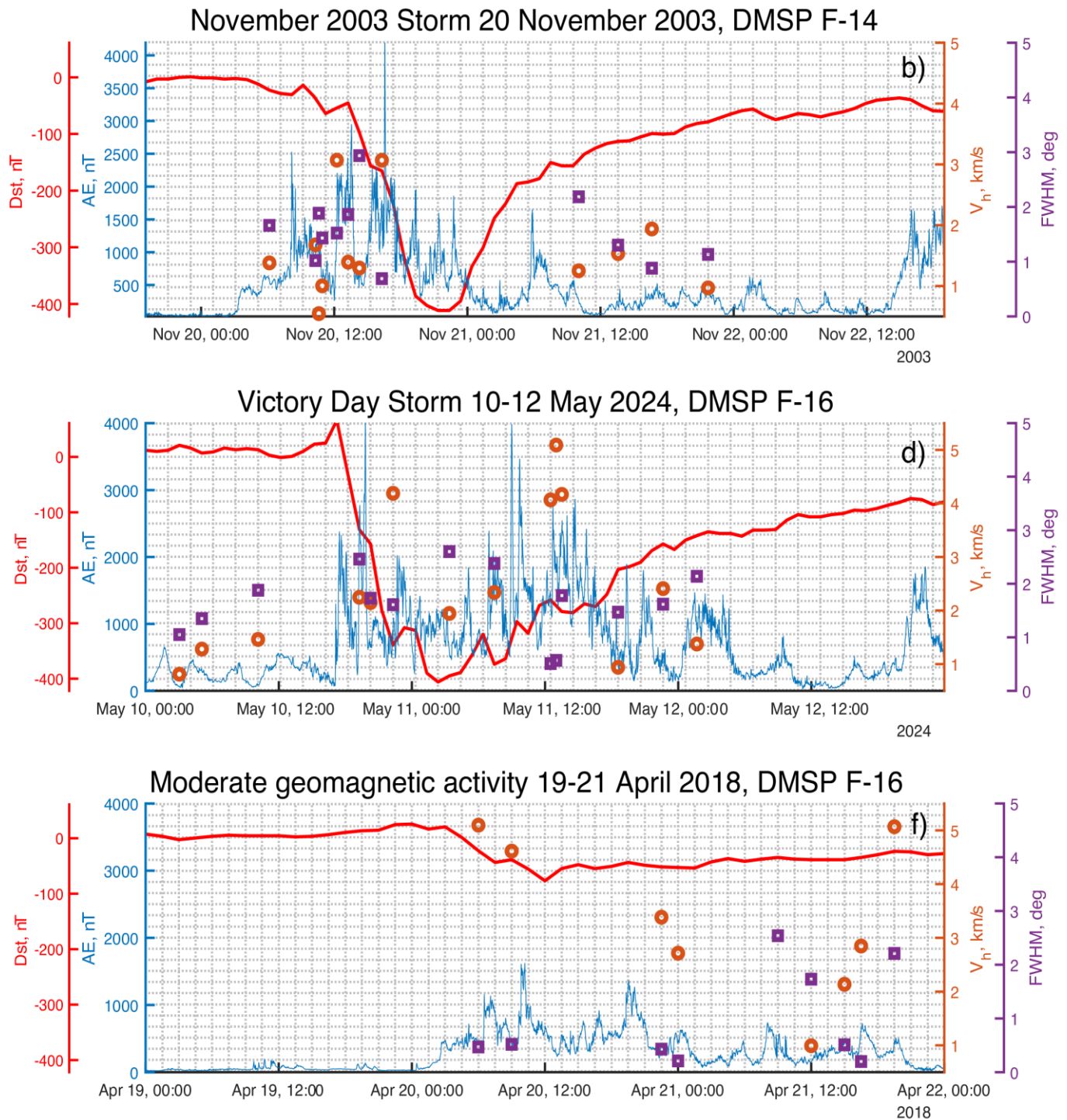


Рисунок 4.12b,d,f — Пиковая скорость горизонтального дрейфа ионов внутри ПД (красные круги) и полуширина ПД (фиолетовые квадраты) во время экстремальных геомагнитных бурь:

Ноябрьская буря 20 ноября 2003 года (b), Буря Победы 10–12 мая 2024 года (d) и умеренное геомагнитное возмущение 19–21 апреля 2018 года (f), относительно геомагнитных индексов Dst и AE.

В 2003 году через 20 суток после Хэллоуинской бури произошла ещё одна экстремальная геомагнитная буря — Ноябрьская супербуря, которую часто рассматривают совместно с Хэллоуинской (как часть так называемых «Хэллоуинских бурь»), хотя формально

они не относятся к Хэллоуинским событиям. Минимальный индекс Dst во время нее составлял -422 нТл, что, как было сказано ранее, до сих пор остается самым низким значением индекса Dst в 21 веке. Несмотря на высокую интенсивность бури, ее длительность была относительно небольшой — чуть больше суток с ~08 UT 20 ноября по ~12 UT 21 ноября. Авроральная геомагнитная активность (индекс AE) во время этой бури была заметно ниже, чем во время Хэллоуинской бури, при том, что минимальное значение глобального геомагнитного индекса Dst было заметно ниже. В работе (Hecht et al., 2008) представлен большой обзор влияния Ноябрьской бури на состав термосферы и распределение энергии в авроральной области, а в статье (Grechnev et al., 2014) подробно исследуется источник возникновения этой бури — сложная трансформация эруптивного волокна на Солнце, которая привела к началу геоэффективного КВМ. ПД во время Ноябрьской бури, как и во время Хэллоуинской, не исследовался, однако был исследован SAPS. В работе (He et al., 2019) по измерениям DMSP F-13–F-16 во время этой бури наблюдаются так называемые осцилляции SAPS (SAPSO — SAPS Oscillations), совпадающие с осцилляциями B_y ММП при переходе от положительных к отрицательным значениям, и авторы связывают их с неустойчивостью сдвигового течения-баллонной моды во внутреннем плазмосферном пограничном слое при наложении на него кольцевого тока. В статье (Lin et al., 2022) во время Ноябрьской бури рассматриваются необычные случаи возникновения SAPS в утренних секторах MLT («dawnside SAPS», в противоположность обычному вечернему «duskside SAPS»). Авторы объясняют это значительным изменением конфигурации кольцевого тока во время сильных геомагнитных бурь, при котором граница нисходящих R2 FAC сдвигается в сторону утренних секторов MLT.

На Рисунке 4.12b представлены измерения параметров ПД во время Ноябрьской бури 20 ноября 2003 года. Во время данной бури ПД наблюдается как на основной фазе, что соответствует механизмам «генератор напряжения» (Southwood, Wolf, 1978; Galperin, 2002), так и на фазе восстановления, что соответствует механизму «генератор тока» (Anderson et al., 1993). Таким образом, ПД во время этой бури вероятнее всего сформирован либо механизмом «короткого замыкания» (Mishin, Puhl-Quinn, 2007), либо некоторой комбинацией механизмов «генератор напряжения» и «генератор тока» (Figueiredo et al., 2004). Однако остается открытым вопрос о причинах отсутствия случаев ПД во время пика геомагнитной активности — в минимуме Dst. Это может быть связано как с неизвестными на текущий момент особенностями механизма формирования ПД в максимуме геомагнитной активности, так и с тем, что во время Ноябрьской бури падение индекса Dst было настолько быстрым и интенсивным, что при приближении к минимуму Dst ионосфера настолько быстро меняла свою конфигурацию, что механизмы генерации ПД, будучи инерционными, не успевали устанавливаться. Несмотря на то, что Ноябрьская буря сильнее и в целом структура геомагнитных индексов во время нее

отличается от структуры геомагнитных индексов во время Бури на Хэллоуин, скорости горизонтального дрейфа ионов в ПД во время Ноябрьской бури лишь немного выше и находятся в пределах 1–2 км/с. Исключение составляют два события ПД на основной фазе — в 12 UT 20 ноября со скоростью ~ 3 км/с и полушириной $\sim 1.8^\circ$ и в 17 UT 20 ноября со скоростью ~ 3 км/с и полушириной $\sim 0.8^\circ$. Эти более сильные ПД соответствуют участкам повышения индекса AE с ~ 500 нТл до 2100–2200 нТл, при этом во время фазы восстановления Ноябрьской бури и во время всей Хэллоуинской бури прямой зависимости интенсивности ПД от индекса AE не наблюдается.

Буря Святого Патрика произошла 17 марта 2015 года, получив свое название от соответствующего праздника, отмечаемого в этот день. Несмотря на то, что ее интенсивность была невелика относительно других экстремальных геомагнитных бурь (минимальный Dst = -234 нТл), поскольку она была сильнейшей в небогатом на геомагнитные события 24 солнечном цикле, эта буря стала одной из самых обсуждаемых в научной литературе. Авторы (Astafyeva et al., 2015) с использованием мультиинструментального подхода исследовали влияние Бури Святого Патрика на глобальную ионосферу. Была обнаружена асимметрия между полушариями несмотря на то, что буря произошла близко к весеннему равноденствию. Также стало известно, что наибольшему влиянию бури подверглась ионосфера низких широт над Американским и Восточно-Тихоокеанским сектором. Влияние Бури Святого Патрика на ионосферу над Иркутском исследовали в статье (Михалев и др., 2018), где сообщалось о наблюдении полярных сияний на широте Иркутска ($\sim 52^\circ$ географической широты). Характерные особенности свечений позволили предположить, что наблюдаемые сияния представляют собой SAR-дуги. Сцинтилляции и потери сигналов спутников GPS во время данной бури исследовались в статье (Jin, Oksavik, 2018). Как и во время двух предыдущих рассмотренных бурь, во время Бури Святого Патрика изучался преимущественно SAPS, за исключением уже упомянутой в первой Главе диссертации статьи (Wei et al., 2019), авторы которой наблюдали DSAID по измерениям DSMP F-17 и F-18 во время этой бури и высказывали предположения о механизме его формирования.

Случаи ПД, зафиксированные во время Бури Святого Патрика по измерениям DSMP F-16, показаны на Рисунке 4.12с. На основной фазе бури присутствуют колебания AE от 500 до 2200 нТл, а также несколько внутренних подструктур бури по Dst, которые могут быть связаны с приходом различных более мелких ударных волн от KBM. Однако явной зависимости параметров ПД от этих колебаний и структур не наблюдается. В первой половине основной фазы бури с 08 до 12 UT 17 марта 2015 года скорость ПД растет с 1.5 км/с до 4 км/с, и его полуширина остается в диапазоне 1° – 2° . Во второй половине основной фазы с 12 UT 17 марта 2015 года до минимума Dst в 00 UT 18 марта 2015 года скорость, сниженная до 2 км/с,

снова растёт и достигает 4.2 км/с. Сам ПД становится в этот момент более узким — от 0.5° до 1.5° широты. Около минимума Dst скорость ПД уже ниже, около 2.2 км/с, сам он при этом расширяется до 2° – 3° . Несмотря на то, что Буря Святого Патрика заметно слабее двух предыдущих рассмотренных бурь, скорость ПД во время нее в среднем в 2–2.5 раза выше. По данной буре и Рисунку 4.12 в целом заметно, что в большинстве случаев чем скорость ПД выше, тем он более узкий. Это согласуется с результатами (Figueiredo et al., 2004), которые сообщают об антикорреляции между шириной и максимумом интенсивности структур ПД. В (Figueiredo et al., 2004) отмечается, что это признак магнитосферного источника ПД, то есть «генератора напряжения» или «короткого замыкания». Также следует отметить, что во время фазы восстановления Бури Святого Патрика ПД практически не присутствует, за исключением относительно слабого (около 1 км/с) и широкого ПД ($\sim 2^\circ$) в ~ 07 UT 18 марта 2015 года.

Буря Победы 10–12 мая 2024 года подробно рассмотрена в предыдущем разделе текущей Главы. На Рисунке 4.12d представлены результаты измерений параметров ПД во время всех пролетов спутника DMSP F-16 в течение этой бури. Интересно, что слабый ПД (0.5–1.5 км/с) появляется за 16 часов до начала самой бури в промежутке с 02 до 12 UT 10 мая, при этом значение AE низкое — от 200 до 500 нТл. Далее вплоть до второй половины (до ~ 19 UT) основной фазы ПД отсутствовал. В 19 UT после повышения AE до 2000 нТл ПД возникает со скоростью ~ 2.1 км/с и полушириной 2.5° и в течение трех часов усиливается до ~ 4 км/с, сужаясь до 1.5° . ПД в этом промежутке был зафиксирован также в 21 UT 10 мая со значениями $\text{PeakV} = 2149$ м/с и $\text{FWHN} = 1.73^\circ$ во время пролета, показанного на Рисунках 4.10 и 4.11. Затем ПД исчезает и в 03 UT 11 мая, через один час после достижения минимума Dst, появляется вновь со скоростью ~ 2 км/с. Такая скорость является относительно небольшой для такого высокого уровня геомагнитной активности (~ 400 нТл), если исходить из того, что скорость ПД тем выше, чем сильнее геомагнитная активность. На фазе восстановления ПД снова «разгоняется» и к моменту подъема AE до ~ 2500 нТл в ~ 14 UT 11 мая его скорость достигает 4–5 км/с. В последней части фазы восстановления скорость снова снижается до 0.5–2.5 км/с.

ПД во время Бури Победы также исследован по наземным измерениям Калининградской обсерватории Ладушкин, а также с помощью численного моделирования по модели GSM-TIP (Global Self-consistent Model of Thermosphere, Ionosphere, Protonosphere) (Klimenko et al., 2026). Авторы исследовали преимущественно ПД, обнаруженный во временном промежутке с 18 до 20 UT 10 мая 2024 года. Моделирование ПД показало, что на высоте 350 км скорость ПД достигает ~ 750 м/с, его ширина $\sim 3^\circ$, а распределение изменений в температуре и концентрации электронов в поперечном разрезе напоминают форму «падающей капли». Кроме того, авторы представили новый метод исследования параметров STEVE и ПД — измерение скорости дрейфа по скорости сдвига структур STEVE на запад, наблюдаемого на камерах всего неба.

Как было упомянуто выше, спустя пять месяцев после майской Бури Победы 2024 года произошла еще одна, менее сильная, чем Буря Победы, но все еще очень интенсивная (минимальный $Dst = -333$ нТл) геомагнитная буря 10–12 октября 2024 года. ПД во время этой бури ранее исследован не был. На Рисунке 4.12е представлены параметры измеренных случаев ПД во время Октябрьской бури 2024 года. Как можно наблюдать, повышение индекса АЕ практически отсутствует за пределами глобальной геомагнитной буревой активности (изменений индекса Dst). Также за ее пределами отсутствуют и случаи обнаружения ПД, при этом прямой зависимости интенсивности ПД от индекса АЕ, как и во время предыдущих бурь, не наблюдается. Несмотря на то, что Октябрьская буря была слабее Бури Победы, скорости ПД во время нее заметно выше (2–5.5 км/с). ПД присутствует как на основной фазе, так и на фазе восстановления Октябрьской бури, в то время как около минимума Dst усиление ПД отсутствует. Все это говорит о том, что прямой зависимости интенсивности ПД от значений индексов геомагнитной активности АЕ и Dst в случае экстремальных геомагнитных бурь, по-видимому, нет.

Дополнительно было проведено сравнение параметров ПД во время экстремальных геомагнитных бурь с параметрами ПД во время средней геомагнитной активности. Для этого указанным выше методом были проанализированы данные за среднюю геомагнитную активность 20 апреля 2018 года (Рисунок 4.12f), которая была подробно исследована в предыдущих Главах настоящей диссертационной работы. Узкие (0.5° – 2° широты) и быстрые (2–5 км/с) горизонтальные дрейфы наблюдаются как на основной фазе, так и на фазе восстановления средней геомагнитной активности при значениях АЕ от 500 до 1000 нТл. Наличие настолько интенсивных ПД при низкой по сравнению с экстремальными геомагнитными бурями подтверждает отсутствие зависимости интенсивности ПД от интенсивности геомагнитной активности в целом. Однако для того, чтобы убедиться в том, что настолько сильные ПД не являются особенностью именно этого случая, необходимо в дальнейшем исследовать большее количество случаев средней и малой геомагнитной активности с помощью метода, описанного в данном разделе.

4.4 Обсуждение

В текущей Главе исследованы параметры ПД во время сильнейших геомагнитных событий 21 века, а также использован комплексный мультиинструментальный подход для изучения экстремальной Бури Победы 2024 года, что позволило более подробно рассмотреть ПД во время нее. Следует отметить, что 11–12 мая 2024 года, когда геомагнитная активность начала существенно снижаться, о чем свидетельствует повышение индекса Dst (Рисунок 4.2) и

значительное уменьшение или даже отсутствие изменений в компонентах магнитного поля (Рисунок 4.3), все еще наблюдались различные процессы, связанные с ПД. В это время камера всего неба все еще регистрировала интенсивное фиолетовое свечение (STEVE), ионозонд зафиксировал сильное диффузное F-рассеяние, а над Калининградской областью наблюдались значительные пики ROT. Кроме того, спутниковые наблюдения указывают на наличие ПД в ионосфере во время фазы восстановления геомагнитных возмущений, что согласуется с механизмами «генератора тока» (Anderson et al., 1993) и «короткого замыкания» (Mishin, Puhl-Quinn, 2007). Все это указывает на то, что внутренние процессы в ионосфере сохраняются в течение длительного времени, и в этот период в ионосфере присутствуют плазменные неоднородности различных масштабов, влияющие на радиосигналы разных частот. Помимо подробного анализа ПД во время Бури Победы в текущей Главе исследованы параметры ПД во время всех крупнейших геомагнитных бурь 21 века: Хэллоуинская буря 29–30 октября 2003 года, Ноябрьская буря 20 ноября 2003 года, Буря Святого Патрика 17 марта 2015 года, Буря Победы 10–12 мая 2024 года, Октябрьская буря 10–12 октября 2024 года. Для определения параметров ПД был использован разработанный в рамках данной работы полуавтоматический алгоритм обработки спутниковых данных. Результаты обработки данных измерений спутников DMSF F-14 и F-16 на вечерней стороне в обобщенном виде сведены в Таблицу 2.

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(-412)	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 диссертационной 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 4.12 видно, что во время экстремальных бурь ПД присутствует либо на обеих фазах, либо только на основной фазе. Как указано ранее, авторы (Figueiredo, 2004) сообщали о том, что ПД содержит в себе признаки как «генератора напряжения», так и «генератора тока». ПД, возникающий во время экстремальных геомагнитных бурь, может быть сгенерирован и поддерживаем разными механизмами в разное время, комбинацией нескольких механизмов или каким-то другим, ранее не описанным механизмом.

Согласно Рисунку 4.12 в минимуме Dst экстремальных геомагнитных бурь ПД либо не обнаруживается, либо обнаруживается заметно менее интенсивный. Это может быть связано как с особенностями механизма генерации и поддержания ПД, так и со слишком быстрым изменением конфигурации субавроральной ионосферы в максимуме бури (минимуме Dst), что не дает сформировать устойчивый механизм возникновения ПД. Кроме того, данные, приведенные на Рисунке 4.12, подтверждают еще одно 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 менее интенсивных 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 одной из наибольших средней скоростью (3037 м/с) обнаружен во время значительно менее интенсивной геомагнитной активности среднего уровня 20 апреля 2018 года (минимальный Dst = -78 нТл). Другими словами, во время экстремальной геомагнитной Бури Победы 10–12 мая 2024 года и во время других сильнейших геомагнитных событий 21 века средняя скорость ПД ниже, чем во время умеренных геомагнитных возмущений. Во время настолько сильного геомагнитного возмущения подвижность плазмопаузы и аврорального овала сильно возрастает, а средняя плотность субавроральной плазмы растет, что вероятно не позволяет сформировать устойчивый продолжительный западный дрейф плазмы. Это может объяснять более низкую среднюю скорость ПД во время более сильных геомагнитных бурь и меньшую скорость/частоту наблюдения ПД около минимума Dst. Кроме того, в первом приближении явной корреляции

частоты обнаружения ПД и его скорости не наблюдается и с авроральным геомагнитным индексом AE. Для уточнения этого вывода необходимы дальнейшие исследования — сравнение с бóльшим числом средних и слабых геомагнитных возмущений, а также анализ коэффициентов корреляции параметров ПД и геомагнитной активности.

4.5 Выводы

Основные выводы, полученные в четвертой Главе диссертации:

— Во время экстремальной геомагнитной бури в мае 2024 г. скорость дрейфа ионов внутри 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;

— Сравнение с параметрами ПД во время других экстремальных геомагнитных событий 21 века показало, что скорость ПД во время сильнейших геомагнитных бурь в среднем ниже, чем во время умеренной геомагнитной активности;

— ПД наблюдается либо на основной фазе и фазе восстановления, либо только на основной фазе, во время интенсивных геомагнитных возмущений, что не полностью описывается современными теориями возникновения ПД

— В случае экстремальных геомагнитных бурь не наблюдается прямой зависимости между интенсивностью ПД и значениями индексов геомагнитной активности AE и Dst

— Наблюдается антикорреляция между скоростью и шириной ПД, что может указывать на магнитосферный источник ПД.

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 сине-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 мелкомасштабной структуры, влияния на прохождение радиосигнала через него, зависимости от интенсивности геомагнитной активности, а также многие другие. Результаты, полученные в данной диссертационной работе, позволяют частично ответить на некоторые вопросы.

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.

Также установлено, что ПД 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.

Кроме того, показано, что во время экстремальной геомагнитной бури в мае 2024 г. 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. 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 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 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 Чернышову А. А., а также коллективу лаборатории магнитосферных процессов отдела физики космической плазмы ИКИ РАН за плодотворную совместную работу, всестороннюю поддержку и ценные советы.

Список литературы

1. *Афонин В. В., Филиппов В. М., Шестакова Л. В. и др.* Узкие провалы ионизации в области F по измерениям со спутника «Космос-900» и их сопоставление с наземными наблюдениями // *Космические исследования*. — 1989. — Т. 27, № 2. — С. 267–271.
2. *Башиев Д. Г., Парников С. Г., Гололобов А. Ю., Макаров Г. А., Каримов Р. Р., Иевенко И. Б., Шиокава К.* Статистический анализ событий STEVE и Picket Fence на Якутском меридиане // *Геомагнетизм и аэрономия*. — 2026. — №2, — С. 399–418.
3. *Бондарь Е. Д., Халипов В. Л., Степанов А. Е.* Модель положения экваториальной границы инжекции энергичных ионов при различных уровнях геомагнитной возмущенности // *Гелио- и геофизические исследования: сб. тр. БШФФ-2002*. — Иркутск: ИСЗФ СО РАН, 2003. — С. 97–100.
4. *Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А.* Физика ионосферы. — М.: Наука, 1988. — 528 с.
5. *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.
6. *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.
7. *Гальперин Ю. И., Кранье Ж., Лисаков Ю. В. и др.* Диффузная авроральная зона. I. Модель экваториальной границы диффузной зоны вторжения авроральных электронов в вечернем и околополудном секторах // *Космические исследования*. — 1977. — Т. 15, № 3. — С. 421–434.
8. *Гальперин Ю. И., Сивцева Л. Д., Филиппов В. М. и др.* Субавроральная верхняя ионосфера. — Новосибирск: Наука, 1990. — 192 с.
9. *Гившвили Г. В., Крашенинников И. В., Лещенко Л. Н.* Ионозонд «Парус А»: новый измерительный комплекс ИЗМИРАН // *Электромагнитные и плазменные процессы от недр Солнца до недр Земли: Юбилейный сб. ИЗМИРАН-75 / под ред. В. Д. Кузнецова*. — М., 2015. — С. 150–159.
10. *Головчанская И. В., Козелов Б. В., Дэспирак И. В.* Исследование широкополосной ELF турбулентности по данным спутника FAST // *Геомагнетизм и аэрономия*. — 2012. — Т. 52, № 4. — С. 501–509.

11. *Демин М. Г., Шубин В. Н.* Динамика субавроральной ионосферы в возмущенных условиях // Геомагнетизм и аэрономия. — 1987. — Т. 27, № 3. — С. 398–403.
12. *Демин М. Г., Шубин В. Н.* Эффекты электрических полей в ночной субавроральной области // Геомагнетизм и аэрономия. — 1988. — Т. 28, № 3. — С. 409–415.
13. *Дремин И. М., Иванов О. В., Нечитайло В. А.* Вейвлеты и их использование // Успехи Физических Наук. — 2001. — Т. 171. — С. 465–501.
14. *Захаров В. И., Чернышов А. А., Милох В. Я., Джин Я.* Влияние ионосферы на параметры навигационных сигналов GPS во время геомагнитной суббури // Геомагнетизм и аэрономия. — 2020. — Т. 60, № 6. — С. 769–782. — DOI: 10.31857/S0016794020060152.
15. *Иевенко И. Б., Алексеев В. Н.* Влияние суббури и бури на динамику SAR-дуги. Статистический анализ // Геомагнетизм и аэрономия. — 2004. — Т. 44, № 5. — С. 643–654.
16. *Иевенко И. Б., Парников С. Г.* Наземные и спутниковые наблюдения SAR-дуги в вечернем секторе MLT в начале магнитной бури 17 марта 2015 г. // Геомагнетизм и аэрономия. — 2020. — Т. 60, № 6. — С. 751–761. — DOI: 10.31857/S0016794020050090.
17. *Котова Д. С., Захаренкова И. Е., Клименко М. В. и др.* Формирование ионосферных неоднородностей в Восточно-Сибирском регионе во время геомагнитной бури 27–28 мая 2017 года // Химическая физика. — 2020. — Т. 39, № 4. — С. 80–92. — DOI: 10.31857/S0207401X20040093.
18. *Михалев А. В., Белецкий А. Б., Васильев Р. В. и др.* Спектральные и фотометрические характеристики среднеширотного сияния во время магнитной бури 17 марта 2015 г. // Солнечно-земная физика. — 2018. — Т. 4, № 4. — С. 54–61. — DOI: 10.12737/szf44201806.
19. *Решетников Д. Д., Филиппов В. М., Башиев Д. Г. и др.* Морфология и динамика узких провалов ионизации в субавроральной области F. — Якутск, 1987. — 39 с.
20. *Сивцева Л. Д., Филиппов В. М., Халипов В. Л. и др.* Исследования среднеширотного ионосферного провала с помощью наземных геофизических методов и синхронных измерений со спутников // Космические исследования. — 1983. — Т. 21, № 4, — С. 584.
21. *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.
22. *Степанов А. Е., Гололобов А. Ю., Халипов В. Л. и др.* Вариации ионосферных параметров при формировании поляризационного джета // Геомагнетизм и аэрономия. — 2021. — Т. 61, № 1. — С. 60–65. — DOI: 10.31857/S0016794021010156.
23. *Степанов А. Е., Данилов С. И., Башиев Д. Г. и др.* Время жизни поляризационного джета при длительных магнитных бурях // Солнечно-земная физика. — 2024. — Т. 10, № 2. — С. 53–59. — DOI: 10.12737/szf-102202405.

24. Филиппов В. М., Шестакова Л. В., Гальперин Ю. И. Полоса быстрого дрейфа ионов в субавроральной F-области и ее проявление в структуре высокоширотной ионосферы // Космические исследования. — 1984. — Т. 22, № 4. — С. 557.
25. Филиппов В. М., Решетников Д. Д., Соловьев В. С. и др. Наземные измерения полосы быстрого западного ионного дрейфа. — Якутск, 1985. — С. 13–16.
26. Филиппов В. М., Решетников Д. Д., Халипов В. Л. и др. Комплексные измерения узких провалов ионизации в области F наземными и спутниковыми методами // Космические исследования. — 1989. — Т. 27, № 4. — С. 568–584.
27. Филиппов В. М. Конвекция плазмы в субавроральной зоне. — Якутск, 1996. — 122 с.
28. Халипов В. Л., Гальперин Ю. И., Лисаков Ю. В. и др. Диффузная авроральная зона. II. Формирование и динамика полярного края субаврорального ионосферного провала в вечернем секторе // Космические исследования. — 1977. — Т. 15, № 5. — С. 708–724.
29. Халипов В. Л., Степанов А. Е., Котова Г. А. и др. Вариации положения поляризационного джета и границы инжекции энергичных ионов во время суббурь // Геомагнетизм и аэрономия. — 2016. — Т. 56, № 2. — С. 187–193. — DOI: 10.7868/S0016794016020085.
30. Халипов В. Л., Степанов А. Е., Котова Г. А. и др. Результаты наблюдений дрейфов ионосферной плазмы в области поляризационного джета // Геомагнетизм и аэрономия. — 2019. — Т. 59, № 5. — С. 578–581. — DOI: 10.1134/S0016794019050134.
31. Чернышов А. А., Могилевский М. М., Козелов Б. В. Фрактальный подход к описанию авроральной области // Физика плазмы. — 2013. — Т. 39, № 7. — С. 636–646. — DOI:10.7868/S0367292113060024.
32. Чугунин Д. В., Чернышов А. А., Моисеенко И. Л. и др. Мониторинг области ускорения электронов при помощи аврорального километрового радиоизлучения // Геомагнетизм и аэрономия. — 2020. — Т. 60, № 5. — С. 566–575.
33. Adhikari L., Zank G. P., Hu Q. et al. Turbulence transport modeling of the temporal outer heliosphere // Astrophysical Journal. — 2014. — Vol. 793, Iss. 1. — P. 52. — DOI: 10.1088/0004-637X/793/1/52.
34. Afonin V. V., Alexeyev V. N., Ievenko I. B. et al. Satellite and ground-based measurements of the SAR-Arc phenomena // Physics and Chemistry of the Earth. — 2000. — Vol. 25, Iss. 1. — P. 63–66. — DOI: 10.1016/S1464-1917(99)00038-0.
35. Ahmed M., Sagalyn R. C., Wildman P. J. L. et al. Topside ionospheric trough morphology: occurrence frequency and diurnal, seasonal and altitude variations // Journal of Geophysical Research. — 1979. — Vol. 84, No. 2. — P. 489.

36. *Alken P., Thébault E., Beggan C. D. et al.* International Geomagnetic Reference Field: the thirteenth generation // *Earth, Planets and Space*. — 2021. — Vol. 73. — P. 49. — DOI: 10.1186/s40623-020-01288-x
37. *Anderson P. C., Heelis R. A., Hanson W. B.* The Ionospheric Signatures of Rapid Subauroral Ion Drifts // *Journal of Geophysical Research*. — 1991. — Vol. 96, Iss. A4. — P. 5785–5792. — DOI: 0148-0227/91/90JA-02651.
38. *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.
39. *Anderson P. C., Carpenter D. L., Tsuruda K. et al.* Multisatellite observations of rapid subauroral ion drifts (SAID) // *Journal of Geophysical Research*. — 2001. — Vol. 106, Iss. A12. — P. 29585–29599. — DOI: 10.1029/2001JA000128.
40. *Archer W. E., Knudsen D. J.* Distinguishing subauroral ion drifts from Birkeland current boundary flows // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2018. — Vol. 123, Iss. 1. — P. 819–826. — DOI: 10.1002/2017JA024577.
41. *Archer W. E., Gallardo-Lacourt B., Perry G. W. et al.* STEVE: The optical signature of intense subauroral ion drifts // *Geophysical Research Letters*. — 2019. — Vol. 46. — P. 6279–6286. — DOI: 10.1029/2019GL082687.
42. *Astafyeva E., Zakharenkova I., Förster M.* Ionospheric response to the 2015 St. Patrick's Day storm: A global multi-instrumental overview // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2015. — Vol. 120. — P. 9023–9037. — DOI: 10.1002/2015JA021629.
43. *Barbier D.* The auroral activity at low latitudes // *Annales Geophysicae*. — 1958. — Vol. 14. — P. 334.
44. *Beach T. L.* Perils of the GPS phase scintillation index (sf) // *Radio Science*. — 2006. — Vol. 41. — P. RS5S31. — DOI: 10.1029/2005RS003356.
45. *Benkova N. P., Kozlov E. F., Samorokin N. I. et al.* Two-dimensional Snapshots of Electron Density in the Main Trough and Diffuse Auroral Zone from a Close Network of Ionosondes: Comparison with Measurements from AUREOL-3 Satellite // *The Results of the ARCAD-3 PROJECT and of the Recent Programmes in Magnetospheric and Ionospheric Physics Toulouse Symposium Proceedings*. — 1985. — P. 855–878.
46. *Bolduc L.* GIC observations and studies in the Hydro-Quebec power system // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. — 2002. — Vol. 64, Iss. 16. — P. 1793–1802. — DOI: 10.1016/S1364-6826(02)00128-1.
47. *Burke W. J., Maynard N. C., Hagan M. P. et al.* Electrodynamics of the inner magnetosphere observed in the dusk sector by CRRES and DMSP during the magnetic storm of June

4–6, 1991 // *Journal of Geophysical Research*. — 1998. — Vol. 103. — P. 29399–29418. — DOI: 10.1029/98JA02197.

48. *Burke W. J., Rubin A. G., Maynard N. C. et al.* Ionospheric disturbances observed by DMSP at middle to low latitudes during the magnetic storm of June 4–6, 1991 // *Journal of Geophysical Research*. — 2000. — Vol. 105, Iss. A8. — P. 18391–18405. — DOI: 10.1029/1999JA000188.

49. *Buzulukova N. Y., Galperin Y. I., Kovrazhkin R. A. et al.* Two types of ion spectral gaps in the quiet inner magnetosphere: Interball-2 observations and modeling // *Annales Geophysicae*. — 2002. — Vol. 20, Iss. 3. — P. 349–364. — DOI:10.5194/angeo-20-349-2002.

50. *Carrington R. C.* Description of a singular appearance seen in the Sun on September 1, 1859 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 1859. — Vol. 20. — P. 13–15. — DOI: 10.1093/mnras/20.1.13.

51. *Chernyshov A. A., Mogilevsky M. M., Kozelov B. V.* Use of fractal approach to investigate ionospheric conductivity in the auroral zone // *Journal of Geophysical Research*. — 2013. — Vol. 118, № 7. — P. 4108–4118. — DOI: 10.1002/jgra.50321.

52. *Chernyshov A. A., Karelsky K. V., Petrosyan A. S.* Subgrid-scale modeling for the study of compressible magnetohydrodynamic turbulence in space plasmas // *Physics Uspekhi*. — 2014. — Vol. 57, Iss. 5. — P. 421–452. — DOI: 10.3367/UFNe.0184.201405a.0457.

53. *Chernyshov A. A., Kozelov B. V., Mogilevsky M. M.* Study of auroral ionosphere using percolation theory and fractal geometry // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. — 2017. — Vol. 161. — P. 127–133. — DOI: 10.1016/j.jastp.2017.06.013.

54. *Chernyshov A. A., Miloch W. J., Jin Y. et al.* Relationship between TEC jumps and auroral substorm in the high-latitude ionosphere // *Scientific Reports*. — 2020a. — Vol. 10. — P. 6363. — DOI: 10.1038/s41598-020-63422-9.

55. *Chernyshov A. A., Chugunin D. V., Frolov V. L., et al.* In situ observations of ionospheric heating effects: First results from a joint SURA and NorSat-1 experiment // *Geophysical Research Letters*. — 2020b. — Vol. 47, Iss. 13. — P. e2020GL088462. — DOI:10.1029/2020GL088462.

56. *Chu X., Malaspina D., Gallardo-Lacourt B. et al.* Identifying STEVE's magnetospheric driver using conjugate observations in the magnetosphere and on the ground // *Geophysical Research Letters*. — 2019. — Vol. 46, Iss. 22. — P. 12665–12674. — DOI: 10.1029/2019GL082789.

57. *Clausen L. B. N., Baker J. B. H., Ruohoniemi J. M. et al.* Large-scale observations of a subauroral polarization stream by midlatitude SuperDARN radars: Instantaneous longitudinal velocity variations // *Journal of Geophysical Research*. — 2012. — Vol. 117, Iss. A5. — DOI: 10.1029/2011JA017232.

58. Cornwall J. M., Coroniti F. V., Thorne R. M. Unified theory of SAR arc formation at the plasmapause // *Journal of Geophysical Research*. — 1971. — Vol. 76. — P. 4428. — DOI: 10.1029/JA076i019p04428.
59. Craven J. D., Frank L. A., Ackerson K. L. Global observations of a SAR arc // *Geophysical Research Letters*. — 1982. — Vol. 9. — P. 961. — DOI: 10.1029/GL009i009p00961.
60. Davis T. N., Sugiura M. Auroral electrojet activity index AE and its universal time variations // *Journal of Geophysical Research*. — 1966. — Vol. 71, Iss. 3. — P. 785–801. — DOI: 10.1029/1999JA000188
61. Danilchuk E., Yasyukevich Y., Vesnin A. et al. Impact of the May 2024 Extreme Geomagnetic Storm on the Ionosphere and GNSS Positioning // *Remote Sensing*. — 2025. — Vol. 17. — P. 1492. — DOI: 10.3390/rs17091492.
62. da Silva Picanço G. A., Fagundes P. R., Moro J. et al. Dynamics of polar-equatorial ionospheric irregularities during the 10–13 October 2024 superstorm // *ESS Open Archive*. — 2025. — DOI: 10.22541/essoar.173462761.19206822/v1.
63. de Franceschi G., Alfonsi L., Romano V. et al. Dynamics of high-latitude patches and associated small-scale irregularities during the October and November 2003 storms // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. — 2008. — Vol. 70, Iss. 6. — P. 879–888. — DOI: 10.1016/j.jastp.2007.05.018.
64. de Keyser J., Roth M., Lemaire J. The magnetospheric driver of subauroral ion drifts // *Geophysical Research Letters*. — 1998. — Vol. 25, Iss. 10. — P. 1625. — DOI: 10.1029/98GL01135.
65. de Keyser J. Formation and evolution of subauroral ion drift in the course of a substorm // *Journal of Geophysical Research*. — 1999. — Vol. 104, Iss. A6. — P. 12339–12349. — DOI: 10.1029/1999JA900109.
66. de Keyser J. Storm-Time Energetic Particle Penetration into the Inner Magnetosphere as the Electromotive Force in the Subauroral Ion Drift Current Circuit // *Magnetospheric Current Systems*. — 2000. — Vol. 118. — DOI: 10.1029/GM118p0261.
67. Diaz J. Monitoring May 2024 solar and geomagnetic storm using broadband seismometers // *Scientific Reports*. — 2024. — Vol. 14, No. 1. — P. 30066. — DOI: 10.1038/s41598-024-81079-6.
68. Dungey J. W. Interplanetary magnetic field and auroral zones // *Physical Review Letters*. — 1961. — Vol. 6. — P. 47–48. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.6.47.
69. Ejiri, M. Trajectory traces of charged particles in the magnetosphere // *Journal of Geophysical Research*. — 1978. — Vol. 83, Iss. A10. — P. 4798–4810. — DOI: 10.1029/JA083iA10p04798.

70. *Erickson P. J., Foster J. C., Holt J. M.* Inferred electric field variability in the polarization jet from millstone hill E-region coherent scatter observations // *Radio Science*. — 2002. — Vol. 37, Iss. 2. — P. 11-1–11-14. — DOI: 10.1029/2000RS002531.
71. *Farley D. T.* Two-Stream Plasma Instability as a Source of Irregularities in the Ionosphere // *Physical Review Letters*. — 1963. — Vol. 10. — P. 279–282. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.10.279.
72. *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.
73. *Forte B., Radicella S.* Geometrical control of scintillation indices: What happens for GPS satellites // *Radio Science*. — 2004. — Vol. 39. — P. RS5014. — DOI: 10.1029/2002RS002852.
74. *Foster J. C., Park C. G., Brace L. H. et al.* Plasmopause signatures in the ionosphere and magnetosphere // *Journal of Geophysical Research*. — 1978. — Vol. 83. — P. 1175–1182.
75. *Foster J. C. et al.* Coordinated stable auroral red arc observations: Relationship to plasma convection // *Journal of Geophysical Research*. — 1994. — Vol. 99, Iss. A6. — P. 11429–11439. — DOI: 10.1029/93JA03140.
76. *Foster J. C., Rich F. J.* Prompt midlatitude electric field effects during severe geomagnetic storms // *Journal of Geophysical Research*. — 1998. — Vol. 103. — P. 26367–26372.
77. *Foster J. C., Burke W. J.* SAPS: A new categorization for subauroral electric fields // *EOS Transactions AGU*. — 2002. — Vol. 83. — P. 293–294.
78. *Foster J. C., Vo H. B.* Average characteristics and activity dependence of the subauroral polarization stream // *Journal of Geophysical Research*. — 2002. — Vol. 107, Iss. A12. — P. 1475. — DOI: 10.1029/2002JA009409.
79. *Foster J. C., Rideout W.* Storm enhanced density: Magnetic conjugacy effects. *Annales Geophysicae* // — 2007. — Vol. 25, Iss. 8. — P. 1791–1799. — DOI: 10.5194/angeo-25-1791-2007.
80. *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.
81. *Frisch U.* Turbulence. The legacy of A. N. Kolmogorov. — Cambridge: Cambridge University Press, 1995. — DOI: 10.1017/CBO9781139170666.
82. *Gallardo-Lacourt B., Liang J., Nishimura Y. et al.* On the origin of STEVE: Particle precipitation or ionospheric skyglow? // *Geophysical Research Letters*. — 2018. — Vol. 45, Iss. 16. — P. 7968–7973. — DOI: 10.1029/2018GL078509.
83. *Gallardo-Lacourt B., Frey H. U., Martinis C.* Proton aurora and optical emissions in the subauroral region // *Space Science Reviews*. — 2021. — Vol. 217, Iss. 10. — P. 10. — DOI: 10.1007/s11214-020-00776-6.

84. Galperin Y. I., Ponomarev V. N., Zosimova A. G. Plasma convection in the polar ionosphere // *Annales Geophysicae*. — 1974. — Vol. 30, Iss. 1. — P. 1–7.
85. Galperin Y. I., Khalipov V. L., Filippov V. M. Signature of rapid subauroral ion drifts in the high-latitude ionosphere structure // *Annales Geophysicae*. — 1986. — Vol. 4, No. A2. — P. 145–154.
86. Galperin Y. I., Khalipov V. L., Filippov V. M. *et al.* Large latitudinal ionization gradients in the subauroral F-region during rapid ion drifts // *Acta Geodaetica, Geophysica et Montanistica Hungarica*. — 1987. — Vol. 22, No. 1/2. — P. 97–106.
87. Galperin Y. I., Soloviev V. S., Torkar K. *et al.* Predicting plasmaspheric radial density profiles // *Journal of Geophysical Research*. — 1998. — Vol. 102, Iss. A2. — P. 2079.
88. Galperin Y. I. Polarization jet: characteristics and model // *Annales Geophysicae*. — 2002. — Vol. 20, Iss. 3. — P. 391–404.
89. Ganushkina N. Y., Pulkkinen T. I., Sergeev V. A *et al.* Entry of plasma sheet particles into the inner magnetosphere as observed by Polar/CAMMICE // *Journal of Geophysical Research*. — 2000. — Vol. 105, Iss. A11. — P. 25205–25219. — DOI:10.1029/2000JA900062.
90. Gautam S. P., Adhikari L., Zank G. P. *et al.* Solar cycle dependence of the turbulence cascade rate at 1 au // *The Astrophysical Journal*. — 2024. — Vol. 968, Iss. 1. — P. 12. — DOI: 10.3847/1538-4357/ad4797.
91. Gillies D. M., Donovan E., Hampton D. *et al.* First observations from the TREx spectrograph: The optical spectrum of STEVE and the picket fence phenomena // *Geophysical Research Letters*. — 2019. — Vol. 46, Iss. 13. — P. 7207–7213. — DOI: 10.1029/2019GL083272.
92. Gillies D. M., Liang J., Donovan E. *et al.* The apparent motion of STEVE and the picket fence phenomena // *Geophysical Research Letters*. — 2020. — Vol. 47, Iss. 20. — P. e2020GL088980. — DOI: 10.1029/2020GL088980.
93. Gillies D. M., Liang J., Gallardo-Lacourt B. *et al.* New insight into the transition from a SAR arc to STEVE // *Geophysical Research Letters*. — 2023. Vol. 50, Iss. 6. — P. e2022GL101205. — DOI: 10.1029/2022GL101205.
94. Gjerloev J. W. The SuperMAG data processing technique // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2012. — Vol. 117. — A09213. — DOI: 10.1029/2012JA017683.
95. Goldstein J., Spasojevic M., Reiff P. H. *et al.* Identifying the plasmopause in IMAGE EUV data using IMAGE RPI in situ steep density gradients // *Journal of Geophysical Research*. — 2003. — Vol. 108, Iss. A4. — P. 1147. — DOI:10.1029/2002JA009475.
96. Gonzalez-Esparza J.A., Sanchez-Garcia E., Sergeeva M., *et al.* The Mother's Day geomagnetic storm on 10 May 2024: aurora observations and low latitude space weather effects in Mexico // *Space Weather*. — 2024. — Vol. 22, No. 11. — P. e2024SW004111. — DOI: 10.1029/2024SW004111.

97. *Grebowsky J. M.* Model study of plasmopause motion // *Journal of Geophysical Research*. — 1970. — Vol. 75, Iss. 22. — P. 4329–4333. — DOI: 10.1029/JA075i022p04329.
98. *Grechnev V. V., Uralov A. M., Slemzin V. A. et al.* A Challenging Solar Eruptive Event of 18 November 2003 and the Causes of the 20 November Geomagnetic Superstorm. I. Unusual History of an Eruptive Filament // *Solar Physics*. — 2014. — Vol. 289. — P. 289–318. — DOI: 10.1007/s11207-013-0316-6.
99. *Greenspan M. E., Anderson P. B., Pelagatti J. M.* Characteristics of the thermal plasma monitor (SSIES) for the Defense Meteorological Satellite Program (DMSP) spacecraft S8 through S10 // Report No. AFGL-TR-86-0227; ADA176924, Regis Coll Research Center Weston MA. — 1986.
100. *Harding B. J., Mende S. B., Triplett C. C. et al.* A Mechanism for the STEVE Continuum Emission // *Geophysical Research Letters*. — 2020. — Vol. 47, Iss. 7. — DOI: 10.1029/2020GL087102.
101. *He F., Zhang X., Chen B. et al.* Plasmaspheric trough evolution under different conditions of subauroral ion drift // *Science China Technological Sciences*. — 2012. — Vol. 55. — P. 1287–1294. — DOI: 10.1007/s11431-012-4781-1.
102. *He, F., Zhang X.-X., Chen B.* Solar cycle, seasonal, and diurnal variations of subauroral ion drifts: Statistical results // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2014. — Vol. 119. — P. 5076–5086. — DOI: 10.1002/2014JA019807.
103. *He F., Zhang X.-X., Wang W. et al.* Double-peak subauroral ion drifts (DSAIDs) // *Geophysical Research Letters*. — 2016. — Vol. 43. — P. 5554–5562. — DOI: 10.1002/2016GL069133.
104. *He F., Zhang X.-X., Wang W. et al.* Evolution of the subauroral polarization stream oscillations during the severe geomagnetic storm on 20 November 2003 // *Geophysical Research Letters*. — 2019. — Vol. 46. — P. 599–607. — DOI: 10.1029/2018GL081446.
105. *Heelis R.A., Spiro R. A., Hanson W. B. et al.* Magnetosphere ionosphere coupling in the mid-latitude trough // *Transactions American Geophysical Union*. — 1976. — Vol. S7. — P. 990.
106. *Hecht J. H., Mulligan T., Strickland D. J. et al.* Satellite and ground-based observations of auroral energy deposition and the effects on thermospheric composition during large geomagnetic storms: 1. Great geomagnetic storm of 20 November 2003 // *Journal of Geophysical Research*. — 2008. — Vol. 113. — P. A01310. — DOI:10.1029/2007JA012365.
107. *Haar A.* Zur Theorie der orthogonalen Functionsysteme // *Mathematische Annalen*. — 1910. — Vol. 69. — P. 331–371.
108. *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.

109.*Hoch R. J., Lemaire J.* Stable auroral red arcs and their importance for the physics of the plasmopause region // *Annales Geophysicae*. — 1975. — Vol. 31. — P. 105–110.

110.*Horvath I., Lovell B. C.* Traveling ionospheric disturbances and their relations to storm—enhanced density features and plasma density irregularities in the local evening and nighttime hours of the Halloween superstorms of 29–31 October 2003 // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2010. — Vol. 115, Iss. A9. — P. A09327. — DOI: 10.1029/2009JA015125.

111.*Horvath I., Lovell B. C.* Investigating the development of double-peak subauroral ion drift (DSAID) // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2017. — Vol. 122. — P. 4526–4542. — DOI: 10.1002/2016JA023506.

112.*Horvath I., Lovell B. C.* Investigating the hot zone developed under short-circuiting conditions and the coupled magnetosphere-ionosphere (M-I) system for the subauroral arc's inner-magnetosphere generation environment // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2024. — Vol. 129. — P. e2024JA032552. — DOI: 10.1029/2024JA032552.

113.*Hosokawa K., Kullen A., Milan S. et al.* Aurora in the polar cap: a review // *Space Science Reviews*. — 2020. — Vol. 216, Iss. 1. — P. 15. — DOI: 10.1007/s11214-020-0637-3.

114.*Hunsucker R. D., Hargreaves J. K.* The High-Latitude Ionosphere and its Effects on Radio Propagation — Cambridge Atmospheric and Space Science Series, 2002. Cambridge University Press.

115.*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.

116.*Jia N., Streltsov A. V.* Ionospheric feedback instability and active discrete auroral forms // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2014. — Vol. 119, Iss. 3. — P. 2243–2254. — DOI:10.1002/2013JA019217.

117.*Jin Y., Oksavik K.* GPS scintillations and losses of signal lock at high latitudes during the 2015 St. Patrick's Day storm // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2018. — Vol. 123, Iss. 9. — P. 7943–7957. — DOI: 10.1029/2018JA025933.

118.*Jin Y., Xiong C., Clausen L. et al.* Ionospheric Plasma Irregularities based on In-situ Measurements from the Swarm Satellites // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2020. — Vol. 125. — P. e2020JA028103. — DOI: 10.1029/2020JA028103.

119.*Jones R. A., Rees M. H.* Time dependent studies of the aurora — I. Ion density and composition // *Planetary and Space Science*. — 1973. — Vol. 21, No. 4. — P. 537–557. — DOI: 10.1016/0032-0633(73)90069-X.

120.*Kadomtsev B. B.* Plasma turbulence — London: Academic Press, 1965.

121. *Karlsson E., Marklund G., Blomberg L. et al.* Subauroral electric fields observed by Freja satellite: A statistical study // *Journal of Geophysical Research*. — 1998. — Vol. 103. — P. 4327–4341. — DOI: 10.1029/97JA00333.
122. *Karpachev A.T., Deminov M. G., Afonin V. V.* Model of the mid-latitude ionospheric trough on the base of Cosmos-900 and Intercosmos-19 satellites data // *Advances in Space Research*. — 1996. — Vol. 18, No. 6. — P. 221-230. — DOI:10.1016/0273-1177(95)00928-0.
123. *Keskinen M. J., Basu S., Basu S.* Midlatitude sub-auroral ionospheric small-scale structure during a magnetic storm // *Geophysical Research Letters*. — 2004. — Vol. 31, Iss. 9. — P. L09811. — DOI: 10.1029/2003GL019368.
124. *Khalipov V. L., Galperin Y. I., Alexeev V. N. et al.* Stable auroral red arcs and polarization jet: case study and statistical comparison // *Proceedings of International Symposium «From solar corona through interplanetary space, into Earth magnetosphere and ionosphere»* — 2000. — P. 145–147.
125. *Khalipov V. L., Galperin Y. I., Stepanov A. E. et al.* Formation of a polarization jet at the outburst stage of a substorm: Results of ground-based measurements // *Cosmic Research*. — 2001. — Vol. 39. — P. 244–253.
126. *Khalipov V. L., Galperin Y. I., Stepanov A. E. et al.* Formation of polarization jet during injection of ions into the inner magnetosphere // *Advances in Space Research*. — 2003. — Vol. 31, No. 5. — P. 1303–1308.
127. *Khalipov V. L., Gubsky V. F., Afonin V. V. et al.* SAR-arc characteristics in the region of ring current dissipation and during polarization jet development // *Physics of Auroral Phenomena, Proceedings of the XXVII Annual Seminar, Apatity*. — 2004. — P. 9–12.
128. *Khalipov V. L., Stepanov A. E., Kotova G. A. et al.* Formation of polarization jet during injection of ions into the inner magnetosphere // *Geomagnetism and Aeronomy*. — 2016a. — Vol. 56, No. 2. — P. 187–193. — DOI: 10.1134/s0016793216020080.
129. *Khalipov V. L., Stepanov A. E., Kotova G. A. et al.* Vertical plasma drift velocities in the polarization jet observation by ground Doppler measurements and driftmeters on DMSP satellites // *Geomagnetism and Aeronomy*. — 2016b. — Vol. 56, No. 5. — P. 535–544. — DOI: 10.1134/S0016793216050066.
130. *Khalipov V. L., Stepanov A. E., Ievenko I. B., Kotova G. A., Panchenko V. A.* Formation of red arc in the polarization jet band // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. — Vol. 179. — P. 494–503. — DOI: 10.1016/j.jastp.2018.08.005.
131. *Kintner P., Ledvina B.* The ionosphere, radio navigation, and global navigation satellite systems // *Advances in Space Research*. — 2005. — Vol. 35. — P. 788. — DOI: 10.1016/j.asr.2004.12.076.

132. Kintner P. M., Ledvina B. M., de Paula E. R. GPS and ionospheric scintillations // *Space Weather*. — 2007. — Vol. 5, Iss. 9. — P. S09003. — DOI: 10.1029/2006SW000260.
133. Klimenko V. V., Klimenko M. V., Belyuchenko K. V. et al. Observation and Modeling of Polarization Jet During the 10 May 2024 Geomagnetic Storm: A Case Study for Kaliningrad and Eastern Europe // *Atmosphere*. — 2026. — Vol. 17. — P. 426. — DOI: 10.3390/atmos17050426.
134. Knudsen W. C., Banks P. M., Winningham J. D. et al. Numerical model of the convecting F2 ionosphere at high latitudes // *Journal of Geophysical Research*. — 1977. — Vol. 82, No. 29. — P. 4784–4792. — DOI: 10.1029/JA082i029p04784.
135. Knudsen D. J., Burchill J. K., Buchert S. C. et al. Thermal ion imagers and Langmuir probes in the Swarm electric field instruments // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2017. — Vol. 122, Iss. 2. — P. 2655–2673. — DOI: 10.1002/2016JA022571.
136. Kolmogorov A. N. The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers // *Doklady Akademii Nauk SSSR*. — 1941. — Vol. 30, Iss. 4. — P. 19–21.
137. Kotova G. A. The Earth's plasmasphere: State of studies (a Review) // *Geomagnetism and Aeronomy*. — 2007. — Vol. 47, No. 4. — P. 409–422. — DOI: 10.1134/S0016793207040019.
138. Koustov A., Fiori R., Makarevich R. et al. Observations of high-velocity SAPS-like flows with the King Salmon SuperDARN radar // *Annales Geophysicae*. — 2006. — Vol. 24. — P. 1591–1602. — DOI: 10.5194/angeo-24-1591-2006.
139. Kotova G. A., Verigin M. I., Bezrukikh V. V. Physics-based reconstruction of the 3-D density distribution in the entire quiet time plasmasphere from measurements along a single pass of an orbiter // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2015. — Vol. 120, Iss. 9. — P. 7512–7521. — DOI: 10.1002/2015JA021281.
140. Kozyra J. U., Shelley E. G., Comfort R. H. et al. The role of ring current O⁺ in the formation of stable auroral red arcs // *Journal of Geophysical Research*. — 1987. — Vol. 92. — P. 7487–7502.
141. Kozyra J. U., Nagy A. F., Slater D. W. High-altitude energy source(s) for stable auroral red arcs // *Reviews of Geophysics*. — 1997. — Vol. 35, Iss. 2. — P. 155–190. — DOI: 10.1029/96RG03194.
142. Kunduri B. S. R., Baker J. B. H., Ruohoniemi J. M. et al. An examination of interhemispheric conjugacy in a subauroral polarization stream // *Journal of Geophysical Research*. — 2012. — Vol. 117, Iss. A8. — P. A08225. — DOI: 10.1029/2012JA017784.
143. Lanzerotti L., MacLennan C., Thomson D. Engineering issues in space weather // *Modern Radio Science*. — Oxford: Oxford University Press, 1999. — P. 25–50.

144. *Laundal K. M., Richmond A. D.* Magnetic coordinate systems // *Space Science Reviews*. — 2017. — Vol. 206. — P. 27–59. — DOI: 10.1007/s11214-016-0275-y.
145. *Lee W., Liu G., Wu D. L. et al.* Ionospheric response to the 10 May 2024 geomagnetic storm as observed in GNSS radio occultation electron density // *Journal of Geophysical Research*. — 2025. — Vol. 130, Iss. 3. — DOI: 10.1029/2024JA033489.
146. *Leick A.* GPS satellite surveying. — 2nd ed. — New York: Wiley, 1995.
147. *Li M., Yuan Y., Zhang B. et al.* Determination of the optimized single-layer ionospheric height for electron content measurements over China // *Journal of Geodesy*. — 2018. — Vol. 92. — P. 169–183. — DOI: 10.1007/s00190-017-1054-6.
148. *Li Y., Zhang H., Xu F. et al.* Super equatorial plasma bubbles observed over South America during the October 10 and 11, 2024 strong geomagnetic storm // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. — 2025. — Vol. 22. — P. 1002105. — DOI: 10.1109/LGRS.2025.3603418.
149. *Liang J., Donovan E., Connors M. et al.* Optical spectra and emission altitudes of double-layer STEVE: A case study // *Geophysical Research Letters*. — 2019. — Vol. 46, Iss. 23. — P. 13630–13639. — DOI: 10.1029/2019GL085639.
150. *Lin D., Wang W., Scales W. A. et al.* SAPS in the 17 March 2013 storm event: Initial results from the coupled magnetosphere-ionosphere-thermosphere model // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2019. — Vol. 124. — P. 6212–6225. — DOI: 10.1029/2019JA026698.
151. *Lin D., Wang W., Merkin V. G. et al.* Origin of dawnside subauroral polarization streams during major geomagnetic storms // *AGU Advances*. — 2022. — Vol. 3. — P. e2022AV000708. — DOI: 10.1029/2022AV000708.
152. *Linty N., Minetto A., Dovis F. et al.* Effects of phase scintillation on the GNSS positioning error during the September 2017 storm at Svalbard // *Space Weather*. — 2018. — Vol. 16. — P. 1317–1329. — DOI: 10.1029/2018SW001940.
153. *Liu Y., Xiong C., Wan X. et al.* Instability mechanisms for the F region plasma irregularities inside the midlatitude ionospheric trough: Swarm observations // *Space Weather*. — 2021. — Vol. 19. — P. e2021SW002785. — DOI: 10.1029/2021SW002785.
154. *Lund E. J.* On the dissipation scale of broadband ELF waves in the auroral region // *Journal of Geophysical Research*. — 2010. — Vol. 115. — P. A01201. — DOI: 10.1029/2009JA014545.
155. *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.
156. *Madhanakumar M., Spicher A., Vierinen J. et al.* On the strength of E and F region irregularities for GNSS scintillation in the dayside polar ionosphere // *Journal of Atmospheric and Solar—Terrestrial Physics*. — 2024. — Vol. 256. — P. 106197.

157. *Mayaud P. N.* Derivation, Meaning, and Use of Geomagnetic Indices. — Geophysical Monograph Series. Vol. 22. Washington: American Geophysical Union, 1980.

158. *Maynard N. C.* On large poleward directed electric fields at subauroral latitudes // Geophysical Research Letters. — 1978. — Vol. 5, No. 7. — P. 617–618.

159. *Maynard N. C., Aggson T. L., Heppner J. P.* Magnetospheric observation of large subauroral electric fields // Geophysical Research Letters. — 1980. — Vol. 7, Iss. 11. — P. 881–884. — DOI: 10.1029/GL007i011p00881.

160. *Maynard N. C., Aggson T. L., Heppner J. P.* The Plasmaspheric electric field as measured by ISEE-1 // Journal of Geophysical Research. — 1983. — Vol. 88, No. A5. — P. 3981–3990.

161. *Makarevich R. A., Kellerman A. C., Devlin J. C. et al.* SAPS intensification during substorm recovery: A multi-instrument case study // Journal of Geophysical Research. — 2011. — Vol. 116, Iss. A5. — P. A11218. — DOI: 10.1029/2011JA016916.

162. *Makarevich R. A., Bristow W. A.* Fine structure of subauroral electric field and electron content // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2014. — Vol. 119, Iss. 5. — P. 3789–3802. — DOI: 10.1002/2014JA019821.

163. *Mannucci A. J., Tsurutani B. T., Iijima B. A. et al.* Dayside global ionospheric response to the major interplanetary events of October 29–30, 2003 «Halloween Storms» // Geophysical Research Letters. — 2005. — Vol. 32, Iss. 12. — P. L12S02. — DOI: 10.1029/2004GL021467.

164. *Martinis C., Nishimura Y., Wroten J. et al.* First simultaneous observation of STEVE and SAR arc combining data from citizen scientists, 630.0 nm all-sky images, and satellites // Geophysical Research Letters. — 2021. — Vol. 48, Iss. 8. — P. e2020GL092169. — DOI: 10.1029/2020GL092169.

165. *Martinis C., Griffin I., Gallardo-Lacourt B. et al.* Rainbow of the night: First direct observation of a SAR arc evolving into STEVE // Geophysical Research Letters. — 2022. — Vol. 49, Iss. 11. — P. e2022GL098511. — DOI: 10.1029/2022GL098511.

166. *Matzka J., Stolle C., Yamazaki Y. et al.* The Geomagnetic Kp index and derived indices of geomagnetic activity // Space Weather. — 2021. — Vol. 19, Iss. 5. — P. e2020SW002641. — DOI: 10.1029/2020SW002641.

167. *McIlwain C. E.* Coordinates for mapping the distribution of magnetically trapped particles // Journal of Geophysical Research. — 1961. — Vol. 66, Iss. 11. — P. 3681–3691. DOI:10.1029/JZ066i011p03681.

168. *McNamara L. F.* Quality figures and errors bars for autoscaled Digisonde vertical incidence ionograms // Radio Science. — 2006. — Vol. 41, Iss. 4. — P. RS4011. — DOI: 10.1029/2005RS003440.

169. *Mishin E. V., Burke W. J., Huang C. Y. et al.* Electromagnetic wave structures within subauroral polarization streams // *Journal of Geophysical Research*. — 2003. — Vol. 108, Iss. A8. — P. 1309. — DOI: 10.1029/2002JA009793.

170. *Mishin E. V., Burke W. J.* Storm-time coupling of the ring current, plasmasphere and topside ionosphere: Electromagnetic and plasma disturbances // *Journal of Geophysical Research*. — 2005. — Vol. 110. — P. A07209. — DOI: 10.1029/2005JA011021.

171. *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.

172. *Mishin E. V., Blaunstein N.* Irregularities within Subauroral Polarization Stream-Related Troughs and GPS Radio Interference at Midlatitudes // *In Midlatitude Ionospheric Dynamics and Disturbances, Geophysical Monograph Series*. — 2008. — P. 291–295. — DOI: 10.1029/181GM26.

173. *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.

174. *Mishin E. V., Albert J., Santolik O.* SAID/SAPS-related VLF waves and the outer radiation belt boundary // *Geophysical Research Letters*. — 2011. — Vol. 38, Iss. 21. — P. L21101. — DOI: 10.1029/2011GL049613.

175. *Mishin E. V.* Interaction of substorm injections with the subauroral geospace: Multispacecraft observations of SAID // *Journal of Geophysical Research*. — 2013. — Vol. 118, Iss. 9. — P. 5782–5796. — DOI: 10.1002/jgra.50548.

176. *Mishin E. V., Nishimura Y., Foster J.* SAPS/SAID revisited: A causal relation to the substorm current wedge // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2017. — Vol. 122, Iss. 8. — P. 8516–8535. — DOI: 10.1002/2017JA024263.

177. *Mishin E. V., Streltsov A. V.* Steve and the picket fence: Evidence of feedback-unstable magnetosphere-ionosphere interaction // *Geophysical Research Letters*. — 2019. — Vol. 46, Iss. 24. — P. 14247–14255. — DOI: 10.1029/2019GL085446.

178. *Mishin E. V., Streltsov A. V.* On the kinetic theory of subauroral arcs // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2022. — Vol. 127, Iss. 8. — P. e2022JA030667. — DOI: 10.1029/2022JA030667.

179. *Mishin E. V., Streltsov A. V.* The inner structure of STEVE-linked SAID // *Geophysical Research Letters*. — 2023. — Vol. 50, Iss. 8. — P. e2023GL102956. — DOI: 10.1029/2023GL102956.

180. *Mitchell C. N., Alfonsi L., de Franceschi G. et al.* GPS TEC and scintillation measurements from the polar ionosphere during the October 2003 storm // *Geophysical Research Letters*. — 2005. — Vol. 32, Iss. 12. — P. L12S03. — DOI: 10.1029/2004GL021644.

181. *Moen J., Oksavik K., Alfonsi L. et al.* Space weather challenges of the polar cap ionosphere // *Journal of Space Weather and Space Climate*. — 2013. — Vol. 3. — P. A02. — DOI: 10.1051/swsc/2013025.
182. *Moffett R. J., Quegan S.* The mid-latitude trough in the electron concentration of the ionospheric F layer: A review of observations and modelling // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. — 1983. — Vol. 45. — P. 315–343. — DOI: 10.1016/S0021-9169(83)80038-5.
183. *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.
184. *Muldrew D. B.* F-layer ionization troughs deduced from Alouette data // *Journal of Geophysical Research*. — 1965. — Vol. 70, Iss. 11. — P. 2635–2650. — DOI: 10.1029/JZ070i011p02635.
185. *Nanjo S., Shiokawa K.* Spatial structures of blue low-latitude aurora observed from Japan during the extreme geomagnetic storm of May 2024 // *Earth, Planets and Space*. — 2024. — Vol. 76, No. 1. — P. 156. — DOI: 10.1186/s40623-024-02090-9.
186. *Newell P. T., Gjerloev J. W.* Evaluation of SuperMAG auroral electrojet indices as indicators of substorms and auroral power // *Journal of Geophysical Research*. — 2011. — Vol. 116, Iss. A12. — P. A12211. — DOI: 10.1029/2011JA016779.
187. *Nishimura Y., Donovan E. F., Angelopoulos V. et al.* Dynamics of auroral precipitation boundaries associated with STEVE and SAID // *Journal of Geophysical Research: Space Research*. — 2020. — Vol. 125, Iss. 8. — P. e2020JA028067. — DOI: 10.1029/2020JA028067.
188. *Nishimura Y., Dyer A., Kangas L. et al.* Unsolved problems in strong thermal emission velocity enhancement (STEVE) and the picket fence // *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*. — 2023. — Vol. 10. — P. 1087974. — DOI: 10.3389/fspas.2023.1087974.
189. *Nishimura Y., Gallardo-Lacourt B., Donovan E. F. et al.* Auroral and magnetotail dynamics during quiet-time STEVE and SAID // *Journal of Geophysical Research: Space Research*. — 2024. — Vol. 129, Iss. 11. — P. e2024JA032941. — DOI: 10.1029/2024JA032941.
190. *Nose M., Iyemori T., Sugiura M. et al.* Geomagnetic Dst-index // *World Data Center for Geomagnetism, Kyoto*. — 2015. — DOI: 10.17593/14515—74000.
191. *Oksavik K., van der Meeren C., Lorentzen D. A. et al.* Scintillation and loss of signal lock from poleward moving auroral forms in the cusp ionosphere // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2015. — Vol. 120, Iss. 10. — P. 9161–9175. — DOI: 10.1002/2015JA021528.
192. *Padokhin A. M., Chernyshov A. A., Andreeva E. S. et al.* Tomographic Methods for Studying the Upper Atmosphere and Near-Earth Space: Current State and Development Prospects // *Cosmic Research*. — 2025. — Vol. 63. — P. 284–304. — DOI: 10.1134/S0010952525601392.

193. *Panchenko V. A., Telegin V. A., Romanova N. Y.* Correlation between the orientation of cross-field axes of small-scale anisotropic irregularities in midlatitude ionosphere and drift direction in the F-region // *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics Journal*. — 2019. — Vol. 22, Iss. 4. — P. 53–65. — DOI: 10.32603/1993-8985-2019-22-4-53-65.
194. *Parkinson M. L., Pinnock J. A., Wild J. A. et al.* Interhemispheric asymmetries in the occurrence of magnetically conjugate sub-auroral polarisation streams // *Annales Geophysicae*. — 2005. — Vol. 23, Iss. 4. — P. 1371–1390. — DOI: 10.5194/angeo-23-1371-2005.
195. *Parnikov S. G., Ievenko I. B., Koltovskoi I. I.* Subauroral luminosity STEVE over Yakutia during a substorm: Analysis of the event of March 1, 2017 // *Geomagnetism and Aeronomy*. — 2022. — Vol. 62, No. 4. — P. 434–443. — DOI: 10.1134/s0016793222030136.
196. *Paschmann G., Haaland S., Treumann R.* Auroral plasma physics // *Space Science Reviews*. — 2002. — Vol. 103, Iss. 1. — DOI: 10.1023/A:1023030716698.
197. *Paul K. S., Haralambous H., Moses M. et al.* Effects of the October 2024 storm over the global ionosphere // *Remote Sensing*. — 2025. — Vol. 17, No. 13. — P. 2329. — DOI: 10.3390/rs17132329.
198. *Paxton L. J., Meng C.-I., Fountain G. H. et al.* Special sensor ultraviolet spectrographic imager: An instrument description // *Proceedings of SPIE, Instrumentation for Planetary and Terrestrial Atmospheric Remote Sensing*. — 1992. — Vol. 1745. — DOI: 10.1117/12.60595.
199. *Pi X., Mannucci A. J., Lindqwister U. J. et al.* Monitoring of global ionospheric irregularities using the Worldwide GPS Network // *Geophysical Research Letters*. — 1997. — Vol. 24, No. 18. — P. 2283–2286. — DOI: 10.1029/97gl02273.
200. *Pierrard V., Goldstein J., André N. et al.* Recent progress in physics-based models of the plasmasphere // *Space Science Reviews*. — 2009. — Vol. 145. — P. 193–229. — DOI: 10.1007/s11214-008-9480-7.
201. *Pierrard V., Verhulst T. G., Chevalier J. M. et al.* Effects of the geomagnetic superstorms of 10–11 May 2024 and 7–11 October 2024 on the ionosphere and plasmasphere // *Atmosphere*. — 2025. — Vol. 16, Iss. 1–2. — P. 299. — DOI: 10.3390/atmos16030299.
202. *Prikryl P., Jayachandran P. T., Chadwick R. et al.* Climatology of GPS phase scintillation at northern high latitudes for the period from 2008 to 2013 // *Annales Geophysicae*. — 2015. — Vol. 33, Iss. 5. — P. 531–545. — DOI: 10.5194/angeo-33-531-2015.
203. *Prölss G. W.* Subauroral electron temperature enhancement in the nighttime ionosphere // *Annales Geophysicae*. — 2006. — Vol. 24, Iss. 24. — P. 1871–1885. — DOI: 10.5194/angeo-24-1871-2006.

204. *Puhl-Quinn P. A., Matsui H., Mishin E. et al.* Cluster and DMSP Observations of SAID electric fields // *Journal of Geophysical Research*. — 2007. — Vol. 112. — P. A05219. — DOI: 10.1029/2006JA012065.

205. *Reinisch B. W., Haines D. M., Bibl K. et al.* Ionospheric sounding in support of over-the-horizon radar // *Radio Science*. — 1997. — Vol. 32, Iss. 4. — P. 1681–1694. — DOI: 10.1029/97RS00841.

206. *Rich F. J., Denig W. F.* The major magnetic storm of March 13–14, 1989 and associated ionosphere effects // *Canadian Journal of Physics*. — 1992. — Vol. 70, Iss. 7. — P. 510–525. — DOI: 10.1139/p92-086.

207. *Rino C. L.* A power law phase screen model for ionospheric scintillation: 1 Weak scatter // *Radio Science*. — 1979. — Vol. 14, Iss. 6. — P. 1135–1145. — DOI: 10.1029/RS014i006p01135.

208. *Roble R. G., Rees M. H.* Time-dependent studies of the aurora: Effects of particle precipitation on the dynamic morphology of ionospheric and atmospheric properties // *Planetary and Space Science*. — 1977. — Vol. 25, Iss. 11. — P. 991–1010. — DOI: 10.1016/0032-0633(77)90146-5.

209. *Rodger A. S., Moffett R. J., Quegan S.* The role of ion drift in the formation of ionisation troughs in the mid- and high-latitude ionosphere — A review // *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*. — 1992. — Vol. 54. — P. 1–30. — DOI: 10.1016/0021-9169(92)90082-V.

210. *Rowland D. E., Wygant J. R.* Dependence of the large-scale, inner magnetospheric electric field on geomagnetic activity // *Journal of Geophysical Research*. — 1998. — Vol. 103, No. A7. — P. 14959–14964. — DOI: 10.1029/97JA03524.

211. *Rozhanskii V.* Effect of background plasma on the slowing down of a plasma beam in magnetic field // *Soviet Journal of Plasma Physics*. — 1986. — Vol. 12. — P. 170.

212. *Sahai Y., Becker-Guedes F., Fagundes P. R. et al.* Observations of the F region ionospheric irregularities in the South American sector during the October 2003 «Halloween Storms» // *Annales Geophysicae*. — 2009. — Vol. 27, Iss. 12. — P. 4463–4477. — DOI: 10.5194/angeo-27-4463-2009.

213. *Sandel B. R., Goldstein J., Gallagher D. L. et al.* Extreme ultraviolet imager observations of the structure and dynamics of the plasmasphere // *Space Science Reviews*. — 2003. — Vol. 109, Iss. 1. — P. 25–46. — DOI: 10.1023/B:SPAC.00000007511.47727.5b.

214. *Schmidt G.* Plasma motions across magnetic fields // *Physics of Fluids*. — 1960. — Vol. 3. — P. 961.

215. *Schunk R. W., Walker J. C. G.* Ion velocity distributions in the auroral ionosphere // *Planetary and Space Science*. — 1972. — Vol. 20, Iss. 12. — P. 2175–2191. — DOI: 10.1016/0032-0633(72)90071-2.

216. *Schunk R. W., Banks P. M., Raitt W. J.* Effects of electric fields and other processes upon the nighttime high-latitude F layer // *Journal of Geophysical Research*. — 1976. — Vol. 81, Iss. 19. — P. 3271–3282. — DOI: 10.1029/JA081i019p03271.

217. *Seran E., Frey H. U., Fillingim M. et al.* Demeter high resolution observations of the ionospheric thermal plasma response to magnetospheric energy input during the magnetic storm of November 2004 // *Annales Geophysicae*. — 2008. — Vol. 25, Iss. 12. — P. 2503–2511. — DOI: 10.5194/angeo-25-2503-2007.

218. *Skjæveland A. H., Kotova D. S., Miloch W. J.* Case studies of ionospheric plasma irregularities over Queen Maud Land, Antarctica // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2021. — Vol. 126. — P. e2021JA029963. — DOI: 10.1029/2021JA029963.

219. *Slater D. W., Gurgilio C., Kozyra J. U. et al.* A possible energy source to power stable auroral red arcs: Precipitating electrons // *Journal of Geophysical Research*. — 1987. — Vol. 92. — P. 4543–4552. — DOI: 10.1029/JA092iA05p04543.

220. *Smiddy M., Kelley M. C., Burke W. J. et al.* Intense poleward directed electric fields near the ionospheric projection of the plasmapause // *Geophysical Research Letters*. — 1977. — Vol. 4, No. 11. — P. 543–546. — DOI: 10.1029/GL004i011p00543.

221. *Smith C.W., L'Heureux J., Ness N. F. et al.* The ACE magnetic fields experiment // *Space Science Reviews*. — 1998. — Vol. 86. — P. 613–632. — DOI: 10.1023/A:1005092216668.

222. *Sousasantos J., Rodrigues F. S., Moraes A. O. et al.* On the estimation of scintillation severity using background F-region peak densities: Description and example results using GOLD observations // *GPS Solutions*. — 2024. — Vol. 28. — P. 62. — DOI: 10.1007/s10291-023-01602-6.

223. *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.

224. *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.

225. *Spogli L., Alfonsi L., de Franceschi G. et al.* Climatology of GPS ionospheric scintillations over high and mid—latitude European regions // *Annales Geophysicae*. — 2009. — Vol. 27. — P. 3429–3437. — DOI: 10.5194/angeo-27-3429-2009.

226. *Stepanov A. E., Khalipov V. L., Kobyakova S. E. et al.* Results of observations of ionospheric plasma drift in the polarization jet region // *Geomagnetism and Aeronomy*. — 2019a. — Vol. 59, Iss. 5. — P. 539–542. — DOI: 10.1134/S001679321905013X.

227. *Stepanov A. E., Kobyakova S. E., Khalipov V. L.* Fast subauroral drifts of ionospheric plasma according to data from Yakut meridional chain of stations // *Solar-Terrestrial Physics*. — 2019b. — Vol. 5, Iss. 4. — P. 60–65. — DOI: 10.12737/stp-54201908.
228. *Stepanov A. E., Khalipov V. L., Kobyakova S. E. et al.* Simultaneous ground and satellite measurements of the polarization jet at the Yakutsk station meridian // *Cosmic Research*. — 2023. — Vol. 61, Iss. 4. — P. 283–289. — DOI: 10.1134/S0010952523700314.
229. *St.-Maurice J.-P., Schunk R. W.* Ion Velocity distributions in the high—latitude ionosphere // *Reviews of Geophysics*. — 1979. — Vol. 17, Iss. 1. — P. 99134. — DOI: 10.1029/RG017i001p00099.
230. *Stone E. C., Frandsen A. M., Mewaldt R. A. et al.* The advanced composition explorer // *Space Science Reviews*. — 1998. — Vol. 86. — P. 1–22. — DOI:10.1023/A:1005082526237.
231. *Streltsov A. V., Mishin E. V.* Numerical modeling of localized electromagnetic waves in the nightside subauroral zone // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2003. — Vol. 108, Iss. A8. — P. 1332. — DOI:10.1029/2003JA009858.
232. *Streltsov A. V., Mishin E. V.* On the existence of ionospheric feedback instability in the earth's magnetosphere-ionosphere system // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2018a. — Vol. 123, Iss. 11. — P. 8951–8957. — DOI: 10.1029/2018JA025942.
233. *Streltsov A. V., Mishin E. V.* Ultralow frequency electrodynamics of magnetosphere-ionosphere interactions near the plasmopause during substorms // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2018b. — Vol. 123, Iss. 9. — P. 7441–7451. — DOI: 10.1029/2018JA025899.
234. *Svaldi V., Matsuo T., Kilcommons L. et al.* High-latitude ionospheric electrodynamics during STEVE and non-STEVE substorm events // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2023. — Vol. 128, Iss. 4. — P. e2022JA030277. — DOI: 10.1029/2022JA030277.
235. *Tapping K. F.* The 10.7 cm solar radio flux (F10.7) // *Space Weather*. — 2013. — Vol. 11, Iss. 7. — P. 394–406. — DOI: 10.1002/swe.20064.
236. *Tsyganenko N. A.* A model of the near magnetosphere with a dawn-dusk asymmetry: 1. Mathematical structure // *Journal of Geophysical Research*. — 2002a. — Vol. 107, Iss. A8. — P. 1179. — DOI:10.1029/2001JA000219.
237. *Tsyganenko N. A.* A model of the near magnetosphere with a dawn-dusk asymmetry: 2. Parameterization and fitting to observations // *Journal of Geophysical Research*. — 2002b. — Vol. 107, Iss. A8. — P. 1176. — DOI:10.1029/2001JA000220.
238. *Tsurutani B. T., Gonzalez W. D., Lakhina G. S. et al.* The extreme magnetic storm of 1–2 September 1859 // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2003. — Vol. 108, Iss. A7. — P. 1268. — DOI:10.1029/2002JA009504.

239. *Tsurutani B. T., Mannucci A., Byron I. et al.* Global dayside ionospheric uplift and enhancement associated with interplanetary electric fields // *Journal of Geophysical Research*. — 2004. — Vol. 109, Iss. A8. — P. A08302. — DOI:10.1029/2003JA010342.

240. *van der Meeren C., Oksavik K., Lorentzen D. et al.* GPS scintillation and irregularities at the front of an ionization tongue in the nightside polar ionosphere // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2014. — Vol. 119. — P. 8624–8636. — DOI: 10.1002/2014JA020114.

241. *Vasylyev D., Béniguel Y., Wilken V. et al.* Anisotropic ionospheric scintillation in weak scattering regime // *Advances in Space Research*. — 2024. — Vol. 73, Iss. 7. — P. 3515–3535. — DOI: 10.1016/j.asr.2023.09.021.

242. *Wan X., Xiong C., Wang H. et al.* Spatial characteristics on the occurrence of the nighttime midlatitude medium-scale traveling ionospheric disturbance at topside ionosphere revealed by the Swarm satellite // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2020. — Vol. 125. — P. e2019JA027739. — DOI: 10.1029/2019JA027739.

243. *Wang H., Lühr H., Ritter P. et al.* Temporal and spatial effects of subauroral polarization streams on the thermospheric dynamics // *Journal of Geophysical Research*. — 2012. — Vol. 117, Iss. A11. — DOI:10.1029/2012JA018067.

244. *Wang H., Lühr H.* Seasonal variation of the ion upflow in the topside ionosphere during SAPS (subauroral polarization stream) periods // *Annales Geophysicae*. — 2013. — Vol. 31. — P. 1521–1534. — DOI:10.5194/angeo-31-1521-2013.

245. *Wang Y., Zhang Q.-H., Jayachandran P. T. et al.* Experimental evidence on the dependence of the standard GPS phase scintillation index on the ionospheric plasma drift around noon sector of the polar ionosphere // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2018. — Vol. 123, Iss. 3. — P. 2370–2378. — DOI:10.1002/2017JA024805.

246. *Wanninger L.* The occurrence of ionospheric disturbances above Japan and their effects on precise GPS positioning // *Proceedings of the CRCM*. — 1993. — P. 175.

247. *Watanabe T. H.* Feedback instability in the magnetosphere-ionosphere coupling system: Revisited // *Physics of Plasmas*. — 2010. — Vol. 17, Iss. 2. — P. 022904. — DOI:10.1063/1.3304237.

248. *Wei D., Yu Y., Ridley A. J. et al.* Multi-point observations and modeling of subauroral polarization streams (SAPS) and double-peak subauroral ion drifts (DSAIDs): A case study // *Advances in Space Research*. — 2019. — Vol. 63. — P. 3522–3535. — DOI: 10.1016/j.asr.2019.02.004.

249. *Wharton L. E., Hoegy W. R.* Current to moving spherical and cylindrical electrostatic probes // Report No. X621-71-276, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Md. — 1971.

250. *Yasyukevich Y. V., Vasiliev R. V., Rubtsov A. V. et al.* Extreme magnetic storm of May 10–19, 2024: coupling between neutral and charged components of the upper atmosphere and the effect on

radio systems // *Doklady Earth Sciences*. — 2025. — Vol. 520, No. 2. — P. 33. — DOI: 10.1134/S1028334X24604978.

251. *Yeh H. C., Foster J. C., Rich F. J. et al.* Storm time electric field penetration observed at mid—latitude // *Journal of Geophysical Research*. — 1991. — Vol. 96. — P. 5707–5721. — DOI: 10.1029/90JA02751.

252. *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.

253. *Yuan Z., Qiao Z., Li H. et al.* Subauroral polarization stream on the outer boundary of the ring current during an energetic ion injection event // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2017. — Vol. 122, Iss. 4. — P. 4837–4845. — DOI: 10.1002/2016JA023570.

254. *Zakharenkova I., Cherniak I., Krankowski A. et al.* On detection of super equatorial plasma bubbles in the American sector during the 10–11 October 2024 geomagnetic storm // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2025. — Vol. 130. — P. e2025JA033709. — DOI: 10.1029/2025JA033709.

255. *Zhang Y., Paxton L., Bilitza D. et al.* Near real-time assimilation in IRI of auroral peak E-region density and equatorward boundary // *Advances in Space Research*. — 2010. — Vol. 46, Iss. 8. — P. 1055–1063. — DOI: 10.1016/j.asr.2010.06.029.

256. *Zhang K., Wang H., Wang W.* Local time variations of the equatorial electrojet in simultaneous response to subauroral polarization streams during quiet time // *Geophysical Research Letters*. — 2022. — Vol. 49, Iss. 7. — P. e2022GL098623. — DOI: 10.1029/2022GL098623.

257. *Zhang K., Wang H., Yamazaki Y.* Effects of subauroral polarization streams on the equatorial electrojet during the geomagnetic storm on 1 June 2013: 2. The temporal variations // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2022. — Vol. 127, Iss. 2. — P. e2021JA030180. — DOI: 10.1029/2021JA030180.

258. *Zossi B., Fagre M., Amit H. et al.* Geomagnetic field model indicates shrinking northern auroral oval // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2020. — Vol. 125. — P. e2019JA027434. — DOI: 10.1029/2019JA027434.