



УТВЕРЖДАЮ

Директор ИКИ РАН

Академик РАН

А.А. Петрукович

2026 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного учреждения науки Института космических исследований
Российской академии наук

Диссертация Синевича Александра Алексеевича на тему: «Исследование мелкомасштабной структуры поляризационного джета в субавроральной ионосфере спутниковыми и наземными средствами» выполнена на базовой кафедре физики космоса при Институте космических исследований Российской академии наук федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» и в отделе физики космической плазмы Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института космических исследований Российской академии наук. В период подготовки диссертации соискатель Синевич Александр Алексеевич работал в ИКИ РАН в должности инженера с 15.09.2021 г. по настоящее время.

В 2021 г. окончил магистратуру факультета физики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» по специальности 03.03.02 «Физика».

В 2025 г. Синевич Александр Алексеевич окончил очную аспирантуру федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» по направлению подготовки 03.06.01 «Физика и астрономия», направленность (образовательная программа) «Физика и астрономия».

Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана в НИУ ВШЭ.

Научный руководитель:

- кандидат физико-математических наук Чернышов Александр Александрович, работает в ИКИ РАН в должности старшего научного сотрудника;

По результатам рассмотрения диссертации «Исследование мелкомасштабной структуры поляризационного джета в субавроральной ионосфере спутниковыми и наземными средствами» принято следующее заключение:

Актуальность темы и направление исследования

Настоящая диссертационная работа посвящена исследованию внутренней мелкомасштабной структуры ПД и её 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.

Личный вклад автора при получении результатов, представленных в диссертации

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

Степень достоверности результатов проведенного исследования

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.

Научная новизна полученных результатов

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. Обнаружен новый тип явлений — 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 бывают 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 трансionoсферного 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 г. ($Dst = -412$ нТл) скорость поляризационного джета ниже, чем во время умеренных магнитных возмущений. Это связано с особенностями развития данного экстремального события, приводящими к нарушениям механизмов генерации поляризационного джета вследствие подвижности плазмопаузы/аврорального овала, что не позволяет сформировать устойчивый западный дрейф плазмы.

Научная и практическая значимость результатов исследования

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 радиоизлучения в частотных диапазонах L1 и L2, 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.

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем

Основные результаты диссертации отражены в следующих работах автора:

1. **Синеви́ч А. А.**, Чернышов А. А., Чугунин Д. В., Милох В. Я., Могилевский М. М. Исследование мелкомасштабной структуры поляризационного джета во время геомагнитной бури 20 апреля 2018 г. // Солнечно-земная физика. — 2021. — Т. 7, № 1. — С. 21–33. — DOI: 10.12737/szf-71202103.
2. **Синеви́ч А. А.**, Чернышов А. А., Чугунин Д. В., Милох В. Я., Могилевский М. М. Пространственная структура поляризационного джета по данным спутников NorSat 1 и Swarm // Космические исследования. — 2021. — Т. 59, № 6. — С. 489–497. — DOI: 10.31857/S0023420621060091.
3. **Sinevich A. A.**, Chernyshov A. A., Chugunin D. V., Oinats, A. V., Clausen, L. B. N., Miloch, W. J., Nishitani N., Mogilevsky M. M. Small-scale irregularities within polarization jet/SAID during geomagnetic activity // Geophysical Research Letters. — 2022. — Vol. 49. — P. e2021GL097107. — DOI: 10.1029/2021GL097107.
4. **Sinevich A. A.**, Chernyshov A. A., Chugunin D. V., Clausen L. B. N., Miloch W. J., Mogilevsky M. M. Stratified subauroral ion drift (SSAID) // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2023. — Vol. 128. — P. e2022JA031109. — DOI: 10.1029/2022JA031109.
5. **Синеви́ч А. А.**, Чернышов А. А., Чугунин Д. В., Могилевский М. М., Милох В. Я. Внутренняя структура поляризационного джета: стратифицированный поляризационный джет // Геомагнетизм и аэронавигация. — 2023. — Т. 63, № 6. — С. 764–774. — DOI: 10.31857/S0016794023600333.
6. **Синеви́ч А. А.**, Чернышов А. А., Чугунин Д. В., Могилевский М. М., Милох В. Я. Поляризационный джет и плазменные неоднородности различного масштаба // Известия РАН. Серия физическая. — 2024. — Т. 88, № 3. — С. 438–444. — DOI: 10.31857/S0367676524030139.
7. **Sinevich A. A.**, Chernyshov A. A., Chugunin D. V., Klimenko M. V., Panchenko V. A., Yakimova G. A., Timchenko A. V., Miloch W. J., Mogilevsky M. M. Multi-instrument approach to study polarization jet/SAID and STEVE // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2024. — Vol. 129. — P. e2024JA033222. — DOI: 10.1029/2024JA033222.
8. Kotova D. S., **Sinevich A. A.**, Chernyshov A. A., Chugunin D. V., Jin Y., Miloch W. J. Strong turbulent flow in the subauroral region in the Antarctic can deteriorate satellite-based navigation signals // Scientific Reports. — 2025. — Vol. 15. — P. 3458. — DOI: 10.1038/s41598-025-86960-6.
9. Chernyshov A. A., Klimenko M. V., Nosikov I. A., Borchevskina O. P., Timchenko A. V., Efshov I. I., **Sinevich A. A.**, Ryakhovsky I. A., Yakimova G. A., Bessarab F. S., Yankovsky I. S., Chugunin D. V. Effects in the upper atmosphere and ionosphere in the subauroral region

during Victory Day 2024 geomagnetic storm (May 10–12, 2024) // Advances in Space Research. — 2025. — Vol. 76, Iss. 12. — P. 7325–7350. — DOI: 10.1016/j.asr.2025.02.015.

10. Chernyshov A. A., Klimenko M. V., **Sinevich A. A.**, Timchenko A. V., Nosikov I. A., Chugunin D. V., Yankovsky I. S. Some aspects of Victory Day 2024 geomagnetic storm occurred on May 10–12, 2024, using satellite and ground-based data // Russian Journal of Earth Sciences. — 2025. — Vol. 25. — P. ES501. — DOI: 10.2205/2025es001009.

Все работы опубликованы в журналах, входящих в перечень ВАК и индексируемых в системах РИНЦ, Web of Science и Scopus. Все основные положения исследования опубликованы в указанных статьях.

Соответствие содержания диссертации паспорту специальности «1.3.1 - Физика космоса, астрономия»

Задачи, рассмотренные в диссертации, относятся к следующим разделам паспорта специальности «1.3.1 - Физика космоса, астрономия»: «Магнитосферы и ионосферы Земли, планет и экзопланет. Геомагнитная активность» и «Теоретические и экспериментальные исследования космической плазмы».

ВЫВОД. Кандидатская диссертация Синевича Александра Алексеевича «Исследование мелкомасштабной структуры поляризационного джета в субавроральной ионосфере спутниковыми и наземными средствами» соответствует «Положению о порядке присуждения ученых степеней».

Диссертация рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1 «Физика космоса, астрономия».

Заключение принято на заседании НТС отдела «Физики космической плазмы» Института космических исследований РАН. Присутствовало на заседании 9 членов НТС отдела. Результаты голосования: «за» - 9 чел., «против» - 0 чел., «воздержалось» - 0 чел., протокол от «27» мая 2026г.

Председатель НТС отдела 54 ИКИ РАН
академик РАН



А.А. Петрукович

Секретарь НТС отдела 54 ИКИ РАН



О.В. Сапунова