

ОТЗЫВ
официального оппонента Захарова Виктора Ивановича
на диссертационную работу
Синевича Александра Алексеевича
«ИССЛЕДОВАНИЕ МЕЛКОМАСШТАБНОЙ СТРУКТУРЫ
ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ДЖЕТА В СУБАВРОРАЛЬНОЙ ИОНОСФЕРЕ
СПУТНИКОВЫМИ И НАЗЕМНЫМИ СРЕДСТВАМИ»,
представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.1 – «Физика космоса, астрономия»

Устойчивое развитие северных территорий России и защита интересов страны немыслимы без систем связи и навигации. Вместе с суровыми климатическими условиями, в высоких широтах проявляются особенности магнитного поля Земли и его взаимодействия с околоземной космической плазмой. Изучение особенностей конфигурации ионосферных структур в высоких широтах началось практически со времен открытия ионосферы и продолжается до сих пор. Накоплен значительный материал в КВ-диапазоне, который тем не менее явно недостаточен для практического его применения в перспективных X и Ku связных диапазонах, тем более, что сама конфигурация магнитного поля создает вытянутые, сильно анизотропные, статистически организованные и плохо прогнозируемые структуры в ионосферной плазме.

В этой связи диссертационная работа Синевича Александра Алексеевича посвящена крайне важной и актуальной теме - исследованию внутренней мелкомасштабной структуры поляризационного джета (ПД) и ее влияния на прохождение радиоволн через ионосферу. Несмотря на значительное количество работ, посвящённых крупномасштабным характеристикам ПД, его мелкомасштабная структура оставалась практически неизученной. Это связано с тем, что многие исследования либо не располагали необходимой аппаратурой для детального анализа плазменных возмущений на высотах внешней ионосферы над субавроральными широтами, либо их приборы не обеспечивали измерений с достаточно высоким временным разрешением. Кроме того, само явление ПД существует не постоянно, что также приводит к сложностям в организации его изучения.

В представленной работе применён широкий набор спутниковых данных, при этом впервые использованы измерения спутника NorSat-1 с частотой опроса до 1 кГц, что позволило выявить мелкомасштабные неоднородности плазменных параметров внутри ПД во время геомагнитной активности. Результаты измерений были проанализированы различными методами обработки и анализа данных, что позволило обнаружить новый тип явлений (и даже ввести в научную литературу термин для его обозначения) — стратифицированный ПД, состоящий из крупномасштабных и мелкомасштабных страт ПД.

Особенностью диссертации является то, что, для изучения ПД использован мультиинструментальный подход — уникальная комбинация большого количества одновременных измерений 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. В ходе выполнения работы впервые была изучена динамика и свойства ПД во время экстремальной геомагнитной бури в мае 2024 года.

Результаты, полученные в диссертации, являются новыми, опубликованы в международных и отечественных журналах, широко цитируются и признаны научным сообществом.

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 2 таблицы.

Во **Введении** изложена проблема исследования, сформулированы цели и задачи работы, отмечена новизна, теоретическая и практическая значимость проводимого анализа. Здесь же приведены положения, выносимые на защиту, апробация полученных результатов, личный вклад автора в диссертационную работу, ее структура и объем.

Глава 1 посвящена исследованиям структуры ПД с использованием высокочастотных измерений для изучения его мелкомасштабной структуры. Использование много игольного зонда Ленгмюра на спутнике NorSat-1 с высокой частотой опроса позволило проанализировать тонкую структуру ПД 20 апреля 2018 года и сравнить измерения NorSat-1 с данными спутников Swarm. Уникальность результатов связана с проведенным совместным анализом NorSat-1 и Swarm наблюдений и результатов спутников DMSP и с радарных измерений. Внутри ПД впервые обнаружены неоднородности концентрации и температуры электронов с пространственными размерами вплоть до сотен метров. Обнаружено, что с ростом геомагнитной активности флуктуации плазменных параметров увеличиваются на всех масштабах, причём роль крупномасштабных эффектов растёт по сравнению с мелкомасштабными.

В **Главе 2** продолжены исследования мелкомасштабной структуры ПД с привлечением более широкого набора данных и геомагнитных событий. Высокочастотные данные NorSat-1 проанализированы методами $\Delta N/N$ и вейвлет-преобразования. Обнаружено новое явление — стратифицированный ПД, состоящий из 2–4 крупных страт размером 0.2° – 0.3° широты и нескольких мелких ($<0.1^\circ$), что соответствует линейным размерам менее 4–7 км для диапазона 50° – 70° широты. Установлено, что страты (неоднородности) электронной концентрации могут быть пространственно сдвинуты по широте относительно страт электронной температуры. Мелкомасштабные неоднородности температуры электронов внутри страт ПД выражены сильнее, чем неоднородности концентрации.

Глава 3 посвящена изучению влияния ПД на прохождение радиоволн — сигналов глобальных навигационных систем и наземных ионозондов. По данным сцинтилляционных приёмников в южном полушарии и ионозондов в северном установлено: при прохождении трансionoсферного навигационного сигнала через ПД возрастают амплитудные и фазовые сцинтилляции, происходит потеря захвата сигнала. F-рассеяние на ионограммах во время развития ПД автор связывает с мелкомасштабными неоднородностями в развивающихся стратах, исследованными в Главах 1 и 2.

В **Главе 4** проанализированы параметры ПД во время экстремальных геомагнитных событий, включая Бурю Победы 10–12 мая 2024 года. Обработан большой объём измерений параметров ПД для всех экстремальных бурь XXI века. Показано, что во время Бури Победы скорость ПД ниже, чем при умеренных возмущениях, что может быть связано с нарушениями механизмов генерации ПД из-за подвижности плазмопаузы и аврорального овала, препятствующей формированию устойчивого западного дрейфа. Впрочем, это утверждение требует дополнительных исследований, которые выходят за рамки рассматриваемой работы.

В **Заключении** приведены основные результаты диссертационной работы и обсуждаются перспективы дальнейших исследований.

Все полученные результаты удовлетворяют требованиям научной новизны и актуальности. Обоснованность положений, выносимых на защиту, 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. 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. В практических приложениях во время геомагнитных возмущений необходимо учитывать не только высыпание заряженных частиц в авроральном овале, но и развитие ПД в субавроральной зоне.

Результаты, изложенные в диссертации, представлены в 10 научных статьях, опубликованных в журналах, рекомендованных ВАК и индексируемых РИНЦ, WoS (Web of Science) и Scopus. Результаты диссертационной работы представлены в 27 тезисах докладов на российских и международных конференциях и симпозиумах. Автореферат диссертации соответствует ее содержанию.

Несмотря на высокий уровень изложения и научное качество материала, при изучении текста диссертации возник ряд вопросов и замечаний. Они делятся на содержательные и технические.

1. Большую часть рисунков следовало бы увеличить, поскольку на них плохо видны многие важные детали, см., например рис.1.22. Часть надписей имеет бледно-голубой цвет – стильно, но не контрастно.

2. Использование такого мощного инструмента анализа как вейвлеты требует изучения их характеристик, поскольку ядра часто создавались для решения конкретной задачи. В этой связи применение дискретных преобразований Хаара для анализа данных требует обоснования и дополнительного исследования, например, сравнения с результатами применения других ядер.

3. Различная чувствительность работы разных навигационных систем к гелиофизическим условиям широко известна. В этой связи не ясно, к каким ГНСС относятся спутники, например, PRN49 и PRN73 на стр. 85. Не приведены частоты сбоев или хотя бы их общая продолжительность и продолжительность во время ПД. Как вообще автор предлагает учитывать ПД в задачах распространения сигнала?

4. В целом, ионосферные неоднородности имеют статистическую природу, поскольку являются проявлением турбулентности среды. В этой связи автор к сожалению не использует полученные уникальные данные о параметре спадающего колмогоровского спектра по данным NordSat и Swarm, статистика которого и может стать критерием необходимости учета ПД в задачах распространения.

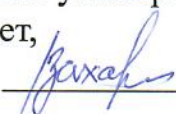
5. Не совсем понятно, какое отношение имеет тема Главы 4 к исследованию мелкомасштабной структуры поляризационного джета.

Указанные замечания не снижают ценности и значимости выполненного автором исследования, достоверности и обоснованности полученных в работе результатов и выводов, но показывают ее актуальность и важность проведенных исследований – как с теоретической, так и с практической сторон.

Рассматриваемая диссертационная работа соответствует пунктам 1, 11, 13 паспорта специальности 1.3.1 – «Физика космоса, астрономия» и отвечает всем требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, установленным пунктом 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 года №842 (ред. 07.06.2021 г.). Представленная работа заслуживает высокой оценки, а ее автор Синеви́ч А. А. – безусловного присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1 – «Физика космоса, астрономия».

Официальный оппонент:

доцент ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», физический факультет, кандидат физико-математических наук,

 **Захаров В. И.**

« 01 » сентября 2026 г.

Даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, а также их дальнейшую обработку.

Адрес места работы: 119991, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д. 1, строение 2. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова». <https://msu.ru/>, <https://phys.msu.ru> .

Контактные данные:

Телефон: +7 915 0022144_____.

Email: zvi_555@list.ru_____.

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация
01.04.03- радиофизика_____.

И.о. Декана физического факультета МГУ,
профессор

 **В.В.Белокуров**



« 09 » _____ 2026 г.