

УДК 550.388.2

ВНУТРЕННЯЯ СТРУКТУРА ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ДЖЕТА: СТРАТИФИЦИРОВАННЫЙ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЙ ДЖЕТ

© 2023 г. А. А. Синеви́ч^{1, 2, *}, А. А. Чернышов¹, Д. В. Чугу́нин¹,
М. М. Могилевский¹, В. Я. Милох³

¹Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН),
Москва, Россия

²Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Москва, Троицк, Россия

³Факультет физики, Университет Осло, Осло, Норвегия
*e-mail: sinevichaa@cosmos.ru

Поступила в редакцию 10.03.2023 г.

После доработки 05.04.2023 г.

Принята к публикации 25.05.2023 г.

Представлены результаты исследования мелкомасштабной внутренней структуры поляризационного джета на основе спутниковых данных с использованием вейвлет-преобразования параметров ионосферной плазмы. Определены минимальные размеры мелкомасштабных неоднородностей температуры и концентрации электронов. Скорее всего, любой поляризационный джет является стратифицированным, как следует из используемой в данной работе выборки. Показано, что вейвлет-преобразование является удобным инструментом для исследования внутренней мелкомасштабной структуры поляризационного джета, причем неоднородности лучше видны по спектрограммам мощности электронной температуры, чем электронной концентрации.

DOI: 10.31857/S0016794023600333, EDN: WWPPWS

1. ВВЕДЕНИЕ

Поляризационный джет (ПД) [Galperin et al., 1974], или Subauroral Ion Drift (SAID) [Spiri et al., 1979], представляет собой узкую (1° – 2° широты) полосу сильного дрейфа (более 1 км/с) ионов за запад на высотах области F субавроральной ионосферы. Значительная скорость дрейфа ионов в полосе ПД может приводить к различным структурным изменениям в субавроральной ионосфере, что, в свою очередь, влияет на распространение в ней радиоволн и отражается на космической погоде. На настоящий момент изучению свойств и механизмов генерации ПД посвящено большое количество научных исследований как по данным измерений спутников (in-situ), так и по наземным радарам и цепочкам ионосферных станций (например, [Anderson et al., 1991, 1993; Karlsson et al., 1998; Figueiredo et al., 2004; Mishin et al., 2017; He et al., 2012; Wang et al., 2012; Халипов и др., 2016a; Horvath and Lowell, 2021; Степанов и др., 2017; Бондарь и др., 2005; Синеви́ч и др., 2021a, б]). Несмотря на то, что экспериментальные и теоретические исследования ПД ведутся уже несколько десятков лет, его свойства и природа до конца не изучены, и изучение этого яв-

ления до сих пор остается одной из актуальных и важных задач физики ионосферы.

На сегодняшний день недостаточно изученной является внутренняя мелкомасштабная структура ПД. Поскольку ПД имеет относительно небольшой пространственный размер (1° – 2° широты), исследование его внутренней структуры с помощью наземных средств практически невозможно, а исследование с помощью спутниковых данных затруднено недостаточно высокой пространственной частотой опроса приборов, установленных на борту спутников. В данной работе для исследования внутренней мелкомасштабной структуры ПД используются данные измерений спутника NorSat-1, запущенного в 2017 г. на солнечно-синхронную орбиту (00 ч местного магнитного времени (MLT – Magnetic Local Time)) на высоту ~600 км. Его особенностью является установленный на борту многоигольный зонд Ленгмюра (m-NLP) [Hoang et al., 2018; Chernyshov et al., 2020], пространственная частота опроса параметров плазмы которого составляет до 1 кГц (частота опроса приборов, используемых ранее – единицы Гц). Кроме того, в представленной работе, для явного доказательства существования ПД во время геомагнитной активности использу-

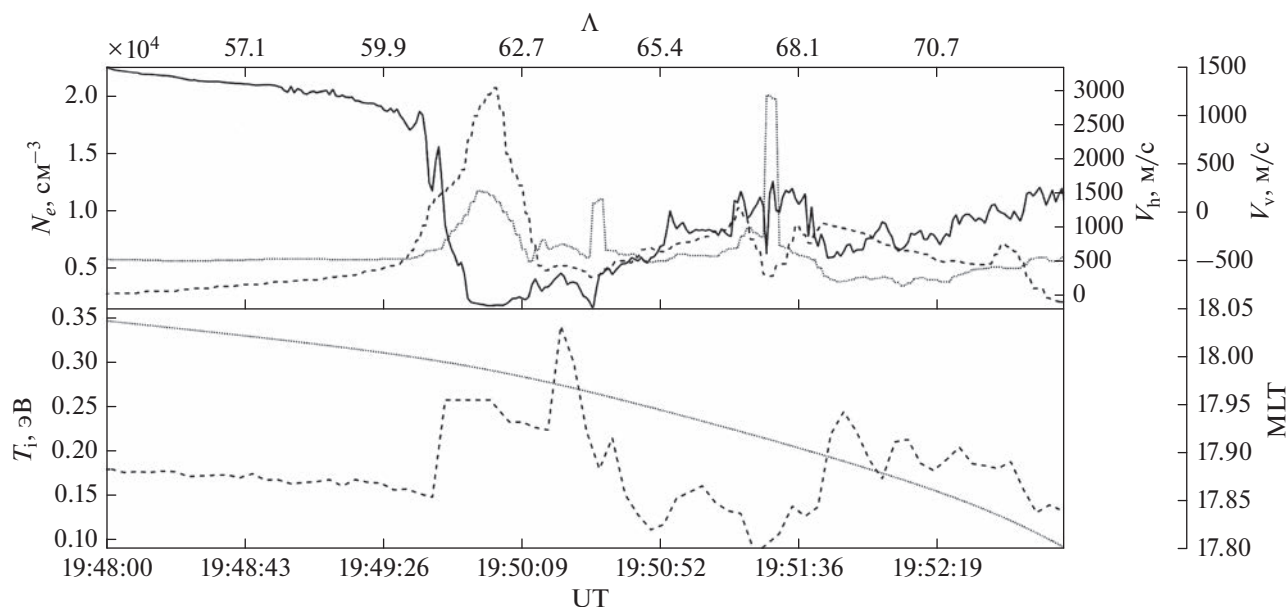


Рис. 1. Верхняя панель — изменение концентрации электронов (сплошная линия), горизонтальной скорости дрейфа ионов (штриховая линия) и вертикальной скорости дрейфа ионов (пунктирная линия) от геомагнитной широты на высоте ~ 850 км (верхняя ось абсцисс) и времени UT (нижняя ось абсцисс) по данным спутника DMSP F-18 во время геомагнитного события 18.03.2018 г. в 19 UT. Нижняя панель — изменение MLT (пунктирная линия) и температуры ионов (штриховая линия) по данным спутника DMSP F-18.

ются данные спутниковой миссии DMSP, проводившей измерения скоростей дрейфа ионов на высоте ~ 850 км.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

В данной работе рассмотрено четыре геомагнитных события: 16.03.2018 г., 18.03.2018 г., 10.04.2018 г. и 09.04.2018 г. Из этих четырех событий в двух, а именно 18.03.2018 г. и 10.04.2018 г., присутствуют данные пролетов спутников DMSP F-18 и F-16. Спутник NorSat-1 не оборудован средствами измерения электрических полей или скорости дрейфа ионов, поэтому подтвердить наличие ПД как узкой полосы дрейфа ионов во время рассматриваемого геомагнитного события возможно только по косвенным признакам. Эти признаки известны из научной литературы. Это — провал электронной концентрации, пространственно совпадающий с подъемом электронной температуры во время развития ПД [Anderson et al., 1991], расположение этого провала на полярной стенке ГИП [Anderson et al., 1991] в субавроральной области в вечернем и полуночном секторах MLT [Spiro et al., 1979]. Для явного подтверждения наличия ПД в рассматриваемом геомагнитном случае необходимы измерения электрических полей или скорости дрейфа ионов. Во время магнитных возмущений 18.03.2018 г. и 10.04.2018 г. присутствуют данные измерений скоростей дрейфа с дрейфметров [Rich, 1994], установленных на спутниках DMSP

F-18 и F-16 во время пролета ими субавроральных широт в секторе вблизи 18 MLT.

На рис. 1 представлены результаты измерений спутника DMSP F-18 в Северном полушарии во время геомагнитного события 18.03.2018 г. в 19 UT. На верхней панели рис. 1 на участке геомагнитных широт 61° – 62.7° в секторе 18 MLT наблюдается провал концентрации электронов, совпадающий с ростом скорости горизонтального дрейфа ионов до 3 км/с и скорости вертикального дрейфа до 200 м/с. На нижней панели рис. 1 на участке 61° – 64° располагается подъем температуры ионов в это время. Необходимо отметить, что пространственное совпадение провала концентрации электронов, роста горизонтальной скорости дрейфа ионов выше 1 км/с [Spiro et al., 1979; Anderson et al., 1991], роста вертикальной скорости дрейфа ионов выше 50–150 м/с [Халипов и др., 2016] и роста температуры ионов [Anderson et al., 1991] в вечернем секторе MLT явно говорит о присутствии в данной области поляризационного джета (ПД). Поскольку ПД растянут вдоль границы высыпаний низкоэнергичных электронов (Soft Electron Boundary — SEB) с 18 до 02 ч MLT [Spiro et al., 1979], присутствие ПД на 18 MLT подтверждает присутствие ПД на 00 MLT, где спутник NorSat-1 проводил измерения.

На рис. 2 показаны измерения спутника NorSat-1 во время геомагнитной активности 18.03.2018 г. в 19 UT. На верхней панели рисунка на участке геомагнитных широт с 52.5° до 50.5° рас-

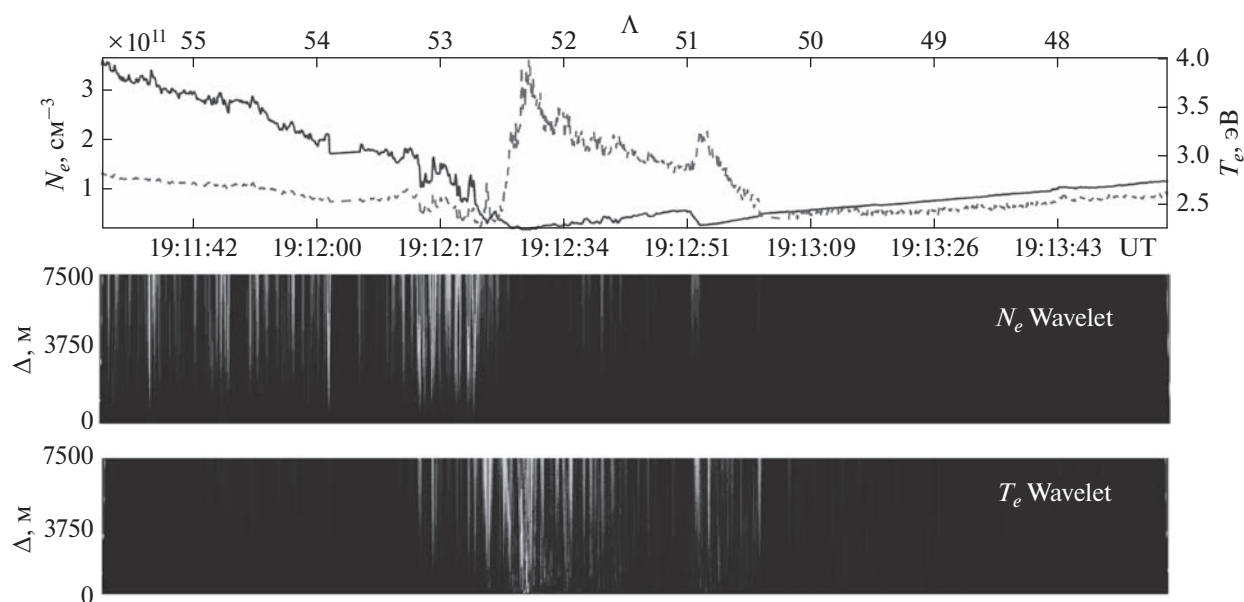


Рис. 2. Верхняя панель — изменение плотности электронов (сплошная линия), температуры электронов (штриховая линия) от геомагнитной широты (верхняя ось абсцисс) и времени UT (нижняя ось абсцисс) по данным спутника NorSat-1 во время геомагнитного события 18.03.2018 г. в 19 UT. Средняя панель — спектрограмма мощности вейвлет-преобразования электронной концентрации по данным спутника NorSat-1. Нижняя панель — спектрограмма мощности вейвлет-преобразования электронной температуры по данным спутника NorSat-1.

положен ПД, который виден на рисунке как провал электронной концентрации в 2–3 раза со стороны Северного полюса в направлении экватора, совпадающий с ростом электронной температуры в ~ 1.5 раза. На средней панели рис. 2 представлена спектрограмма мощности вейвлет-преобразования электронной концентрации по наблюдениям спутника NorSat-1. В качестве базисной вейвлет-функции в данном исследовании 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 [Naag, 1909]. 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. Участок повышенной интенсивности на промежутке 53.5° – 52.5° связан с резким перепадом значения концентрации на полярной стенке ГИП. На нижней панели рис. 2 приведена спектрограмма мощности вейвлет-преобразования электронной температуры по данным спутника NorSat-1. На данной спектрограмме наблюдается два участка повышения интенсивности неоднородностей температуры с пространственными размерами вплоть до 1000–350 м на экваториальном участке и до нескольких сотен метров на полярном участке. Данные участки пространственно совпадают с участками повышения температуры

электронов и локальными провалами электронной концентрации внутри ПД на геомагнитных широтах 52.5° – 51.7° и 51° – 50.5° .

Следует отметить, что расположение ПД во время данного геомагнитного события различается по широте по данным спутников DMSP F-18 и NorSat-1 на $\sim 10^\circ$. Это можно объяснить тем, что средняя геомагнитная широта ПД уменьшается с увеличением MLT в сторону полуночного и утреннего секторов со скоростью $\sim 0.55^\circ$ в ч MLT по данным спутника Freja, как отмечено в работе [Karlsson et al., 1998, панель 1], и со скоростью $\sim 0.7^\circ$ в ч MLT по радарным данным [Foster and Vo, 2002] для SAPS (Subauroral Polarization Stream), который часто находится на тех же широтах. Пролет DMSP F-18 находится в секторе 18 MLT, а NorSat-1 — в секторе 00 MLT, поэтому скорость уменьшения геомагнитной широты в рассматриваемом случае составляет $\sim 1.6^\circ$ в ч MLT. Примечательно, что она более чем в два раза превышает скорость, указанную в предыдущих исследованиях. Кроме того, необходимо также отметить, что положение DMSP приводятся в исправленных геомагнитных координатах AACGM (Altitude adjusted corrected geomagnetic), в то время как координаты спутника NorSat-1 определяются, используя дипольное приближение. Это также может давать расхождение в геомагнитных координатах между спутниками.

В работе Sinevich et al. [2023] по данным спутника NorSat-1 также был исследован ПД во время

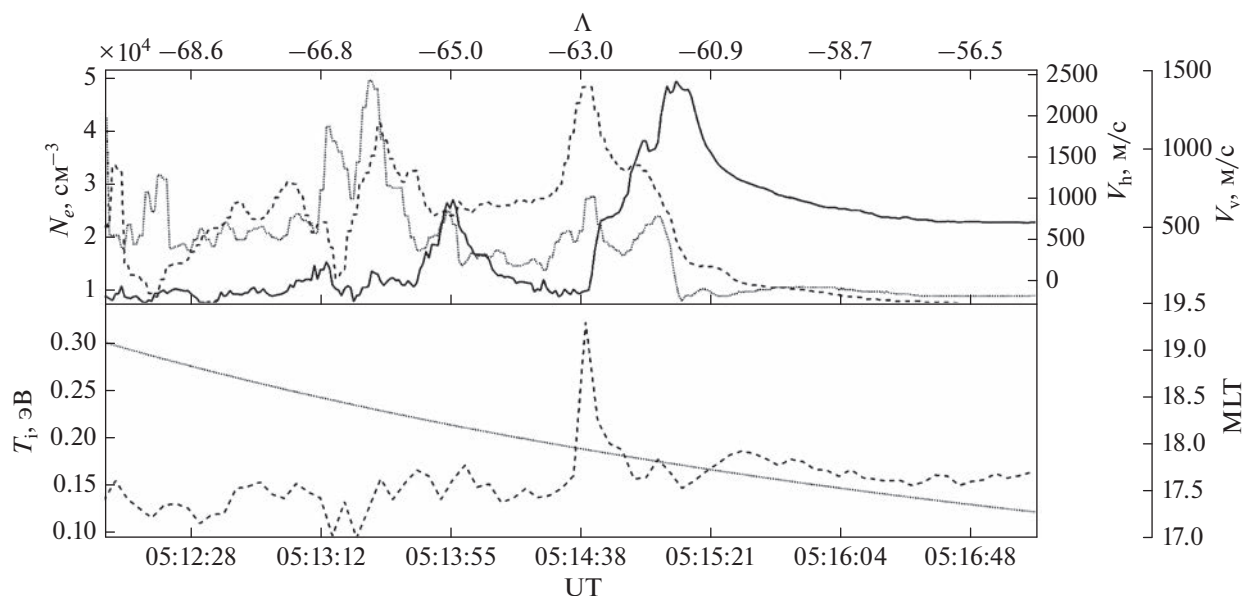


Рис. 3. Верхняя панель — изменение плотности электронов (сплошная линия), горизонтальной скорости дрейфа ионов (штриховая линия) и вертикальной скорости дрейфа ионов (пунктирная линия) от геомагнитной широты (верхняя ось абсцисс) и времени UT (нижняя ось абсцисс) по данным спутника DMSP F-16 во время геомагнитного события 10.04.2018 г. в 05 UT. Нижняя панель — изменение MLT (пунктирная линия) и температуры ионов (штриховая линия) по данным спутника DMSP F-16.

геомагнитного события 18.03.2018 г. с помощью параметров $\Delta N/N$ и $\Delta T/T$. Исследование показало, что этот ПД представляет собой СПД (SSAID — Stratified Subauroral Ion Drift, СПД — стратифицированный поляризационный джет) и состоит из двух крупных страт ПД (PJS — Polarization Jet Stratum, страта поляризационного джета) в электронной температуре и концентрации.

Участки повышения интенсивности неоднородностей на нижней панели рис. 2 на спектрограмме мощности вейвлет-преобразования электронной температуры подтверждают наличие крупных страт ПД внутри данного ПД, который, следовательно, является СПД. Таким образом, на примере данного 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.

Рис. 3 демонстрирует данные измерений спутника DMSP F-16 во время геомагнитного события 10.04.2018 г. в 05 UT. На участке геомагнитных широт от -63.5° до -62.6° в секторе 18 MLT внутри провала электронной концентрации располагается подъем горизонтальной скорости дрейфа ионов до ~ 2300 м/с, пространственно совпадающий с ростом вертикальной скорости дрейфа ионов до ~ 600 м/с. Стоит отметить, что на ниж-

ней панели рисунка на вышеупомянутом участке широт наблюдается заметный рост температуры ионов в ~ 2 раза относительно фонового уровня. Все вышеуказанные характеристики указывают на тот факт, что во время геомагнитного события 10.04.2018 г. в 05 UT в вечернем секторе MLT присутствовал ПД.

На рис. 4 приведены результаты измерений спутника NorSat-1 10.04.2018 г. в 05 UT. На верхней панели рисунка на геомагнитных широтах 56.4° – 55.5° находится ПД, представляющий собой провал электронной концентрации ниже фонового уровня, совпадающий с подъемом электронной температуры. При этом на верхней панели различимы два отдельных участка провала электронной концентрации и подъема температуры на геомагнитных широтах 56.4° – 55.9° для полярного участка и на 55.9° – 55.5° — для экваториального. Данные участки представляют собой страты ПД несмотря на то, что размер данных участков (0.5° и 0.4° широты) несколько больше типичного размера крупных страт ПД (0.2° – 0.3° широты) [Sinevich et al., 2023]. Таким образом, рассматриваемый ПД является СПД. На средней панели рис. 4 на спектрограмме вейвлет-преобразования электронной концентрации плохо видны мелкомасштабные неоднородности внутри СПД. Это связано с тем, что резкий спад электронной концентрации на экваториальной границе высыпаний (полярная граница ГИП) имеет большую амплитуду в вейвлет-преобразовании, на фоне

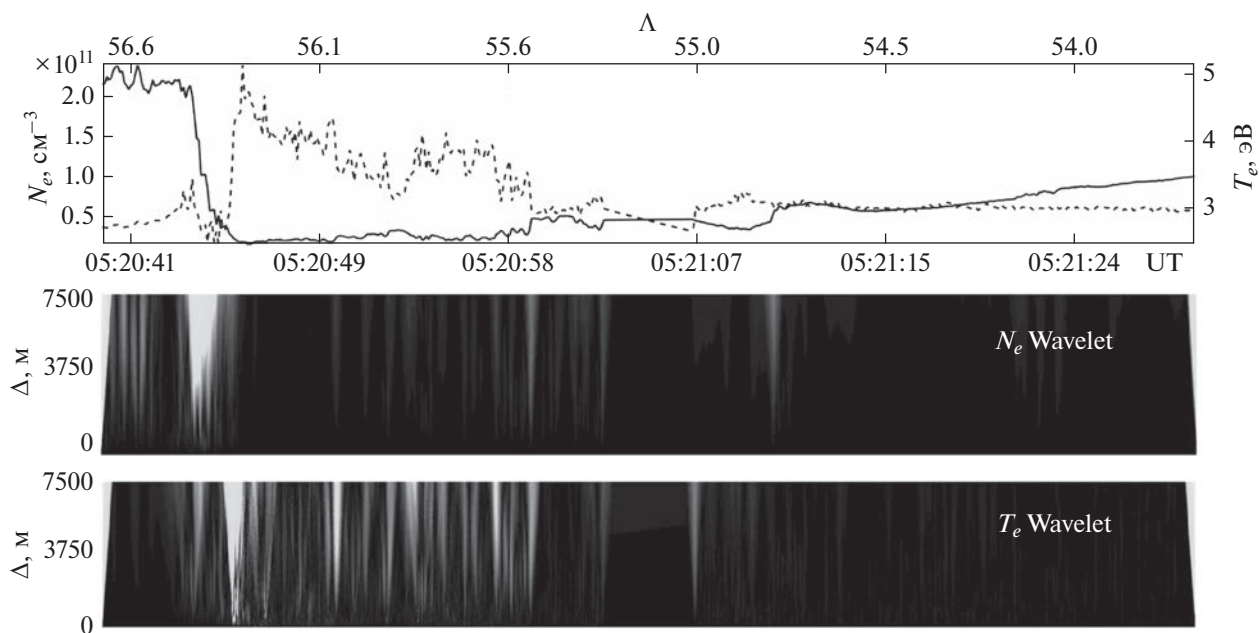


Рис. 4. Верхняя панель — изменение плотности электронов (сплошная линия), температуры электронов (штриховая линия) от геомагнитной широты (верхняя ось абсцисс) и времени UT (нижняя ось абсцисс) по данным спутника NorSat-1 во время геомагнитного события 10.04.2018 г. в 05 UT; Средняя панель — спектрограмма мощности вейвлет-преобразования электронной концентрации по данным спутника NorSat-1. Нижняя панель — спектрограмма мощности вейвлет-преобразования электронной температуры по данным спутника NorSat-1.

которой мелкие неоднородности не заметны глазом. Однако, на нижней панели рис. 4, на которой представлена спектрограмма вейвлет-преобразования электронной температуры, хорошо видно внутри СПД несколько десятков мелких страт ПД. Размеры неоднородностей температуры внутри страт ПД варьируются от сотен метров до километра.

Расположение ПД по данным DMSP F-16 и NorSat-1 во время геомагнитного случая 10.04.2018 г. отличается на 7.1° широты. Интересен тот факт, что скорость уменьшения геомагнитной широты с увеличением MLT в данном случае составляет $\sim 1.18^\circ$ в ч MLT, что меньше, чем во время предыдущего рассмотренного события, и ближе к значениям, указанным ранее в научной литературе [Karlsson et al., 1998; Foster and Vo, 2002].

Результаты измерений спутника NorSat-1 для пролетов во время геомагнитных возмущений 16.03.2018 г. и 09.04.2018 г. представлены на рис. 5 и рис. 6 соответственно. Как было указано выше, данные измерений скоростей дрейфа ионов для этих двух событий не представлены, поскольку во время данных геомагнитных событий отсутствуют данные пролетов спутников программы DMSP с подходящими параметрами орбиты. Таким образом, в данных случаях подтверждение наличия ПД в рассматриваемые моменты времени возможно только на основании многих предыдущих исследований ПД по известным признакам. К ним

относят пространственное совпадение провала электронной концентрации и электронной температуры на типичных для ПД субавроральных широтах в ГИП в вечернем и полуночном секторах MLT. Это было сделано ранее в научной литературе на основе большой статистики с использованием различных спутниковых данных (например, [Spiro et al., 1979; Anderson et al., 1991; Karlsson et al., 1998]).

Согласно предыдущим работам, ПД располагается внутри ГИП [Spiro et al., 1979] экваториальнее границы крупномасштабной ионосферной конвекции [Galperin et al., 1974; Smiddy et al., 1977]. Часто ПД располагается на полярной границе ГИП [Galperin, 2002]. На верхней панели рис. 5 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 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 and Qegan, 1983]. Таким образом, можно утверждать, что спут-

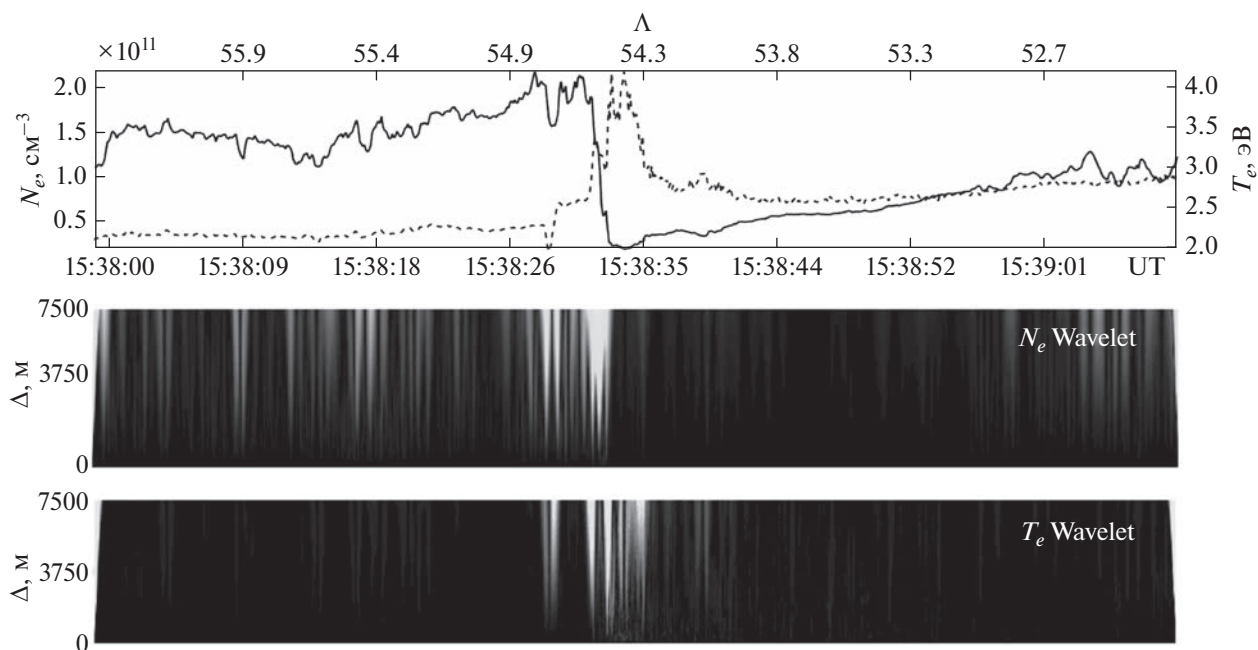


Рис. 5. Верхняя панель — изменение концентрации электронов (сплошная линия), температуры электронов (штриховая линия) от геомагнитной широты (верхняя ось абсцисс) и времени UT (нижняя ось абсцисс) по данным спутника NorSat-1 во время геомагнитного события 16.03.2018 г. в 15 UT. Средняя панель — спектрограмма вейвлет-преобразования электронной концентрации по данным спутника NorSat-1. Нижняя панель — спектрограмма вейвлет-преобразования электронной температуры по данным спутника NorSat-1.

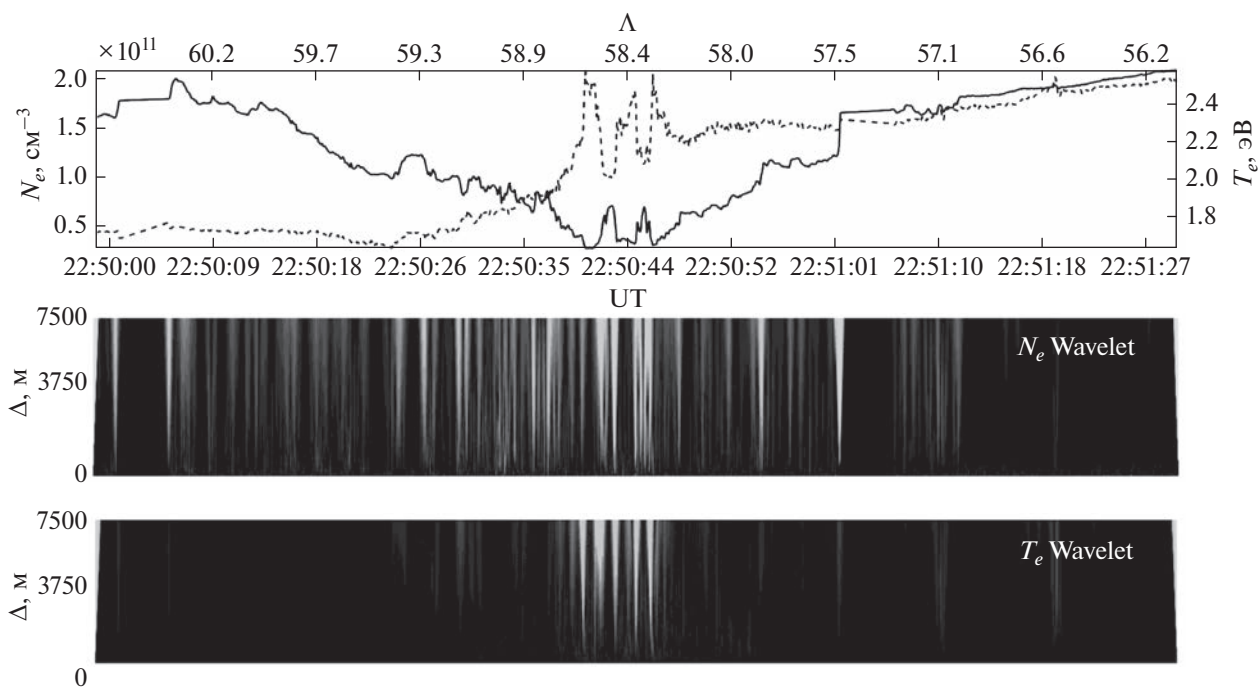


Рис. 6. Верхняя панель — изменение плотности электронов (сплошная линия), температуры электронов (штриховая линия) от геомагнитной широты (верхняя ось абсцисс) и времени UT (нижняя ось абсцисс) по данным спутника NorSat-1 во время геомагнитного события 09.04.2018 г. в 22 UT; Средняя панель — спектрограмма вейвлет-преобразования электронной концентрации по данным спутника NorSat-1. Нижняя панель — спектрограмма вейвлет-преобразования электронной температуры по данным спутника NorSat-1.

ник NorSat-1 16.03.2018 г. в 15 UT пересекал ГИП на геомагнитных широтах 54.5° – 53° . Внутри ГИП на его полярной стенке наблюдается углубление провала электронной концентрации на участке геомагнитных широт 54.5° – 54.3° , 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) четко указывает на то, что данная структура представляет собой ПД.

На средней панели рис. 5 представлена спектрограмма вейвлет-преобразования электронной концентрации по данным спутника NorSat-1 во время геомагнитной активности 16.03.2018 г. в 15 UT. Участок высокой интенсивности на интервале 54.7° – 54.5° связан с резким падением электронной концентрации на полярной стенке ГИП. Как и во время геомагнитных событий 18.03.2018 г., 10.04.2018 г. (рис. 2 и 4 соответственно), рассмотренных выше, на спектрограмме вейвлет-преобразования электронной концентрации плохо видно наличие страт ПД внутри СПД, как и наличие мелкомасштабных флуктуаций внутри страт ПД. На нижней панели рис. 5 на геомагнитных широтах ПД (54.5° – 54.3°), являющегося СПД, хорошо заметно, что имеется около десятка мелких страт ПД, 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. Следует обратить внимание на относительно небольшой пространственный размер рассматриваемого СПД – 0.2° широты, данная ширина является типичной для крупных страт ПД [Sinevich et al., 2022].

На верхней панели рис. 6 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 большое количество участков неоднородностей электронной концентрации и температуры, большое количество из которых отражает наличие мелкомасштабных неоднородностей в ГИП. Внутри СПД пространственный размер неоднородностей электронной концентрации до-

стигает десятков метров. На нижней панели рис. 6 по спектрограмме вейвлет-преобразования электронной температуры наблюдается наличие около десятка мелких страт ПД, минимальный пространственный размер неоднородностей в которых составляет сотни метров.

3. ОБСУЖДЕНИЕ

В данной статье исследована внутренняя структура СПД по четырем отдельным случаям обнаружения ПД во время геомагнитной активности 16.03.2018 г., 18.03.2018 г., 10.04.2018 г. и 09.04.2018 г. по данным спутников NorSat-1, DM-SP F-16 и F-18. Во время каждого из рассмотренных событий внутри ПД были обнаружены страты ПД, следовательно, все рассмотренные ПД представляют собой СПД.

При анализе нестационарных сигналов ограниченной длины удобно использовать оконное Фурье- и вейвлет-преобразование. Согласно принципу неопределенности, применяя оконное преобразование Фурье, добиться сколько-нибудь 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 (например, [Головчанская и др., 2012; Chernyshov et al., 2013, 2017; Чернышов и др., 2013; Чугунин и др., 2020; Lund, 2010]). В данной работе для исследования мелкомасштабной структуры ПД использовалось вейвлет-преобразование, базисная функция которого является функцией Хаара. Считается, что данная базисная функция наиболее подходит для определения резких градиентов, а также разрывов сигнала. В настоящем исследовании по спектрограммам мощности вейвлет-преобразования наблюдаются мелкие страты ПД и неоднородности параметров плазмы внутри них. При этом, как правило, стра-

ты ПД по электронной температуре наблюдаются лучше, чем по электронной концентрации. Это 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.

По спектрограммам вейвлет-преобразования наблюдается наличие неоднородностей температуры и концентрации внутри мелких страт ПД с пространственными размерами от нескольких км до десятков метров. Следует отметить, что минимальный пространственный размер неоднородностей электронной температуры меньше, чем электронной концентрации. Кроме того, минимальный размер неоднородностей внутри СПД меньше у его полярной стенки, где, как правило, расположен самый глубокий провал электронной концентрации внутри ПД и ГИП, как было отмечено в публикации [Galperin, 2002].

Механизм возникновения настолько мелких структур, как неоднородности параметров плазмы внутри страт ПД размером в десятки-сотни метров, в настоящий момент остается слабо изученным вопросом. Механизм формирования страт ПД и мелкомасштабных неоднородностей внутри них может быть тем же, что отвечает за формирование самого ПД, но на гораздо меньших пространственных масштабах.

На сегодняшний день существует несколько теорий генерации ПД. Наиболее часто в настоящий момент в научной литературе упоминается три возможных механизма возникновения ПД: генератор тока, генератор напряжения и модель короткого замыкания. Первые два механизма отличаются в том, какой параметр первым “запускает” процесс формирования ПД – продольный ток или электрическое поле.

В теории генератора тока [Anderson et al., 1993; Karlsson et al., 1998] пространственно разделенные разнонаправленные продольные токи первоначально формируются во внутренней магнитосфере. При замыкании продольных токов током Педерсена через зону низкой проводимости в субавроральной ионосфере возникает сильное электрическое поле, направленное к полюсу. Отметим, что такой подход широко рассматривается как стандартный сценарий для SAPS – “Subauroral Polarisation Streams” (SAPS обычно слабее по величине скорости дрейфа и заметно шире по широте, чем ПД) в ряде наблюдений и численного моделирования (например, [Lin et al., 2019; Yu et al., 2015; Zheng et al., 2008]). Механизм генератора напряжения [Southwood and Wolf, 1978] говорит о возникновении электрических полей, направленных от Земли во внутренней магнитосфере при проникновении энергичных ионов на более низкие широты при сохранении первых

двух адиабатических инвариант в присутствии электрической компоненты поля вдоль траектории дрейфа ионов. Впервые механизм возникновения ПД, был предложен в работе Galperin et al. [1974], который относится к механизмам генерации напряжения. Согласно этому механизму, электрические поля поляризации возникают при разделении зарядов инжектированной плазмы плазменного слоя из-за градиентного дрейфа. В результате чего на ночной и вечерней стороне ионы проходят в меньшие L -оболочки, чем электроны. В работах De Keyser et al. [1998]; De Keyser [1999] была предложена модель, в которой ПД рассматривается как результат взаимодействия горячей инжектируемой и холодной ионосферной плазмы. Согласно этому подходу с учетом тангенциального разрыва электрическое поле возникает за счет разных гирорадиусов для горячих инжектированных ионов, инжектированных электронов и холодной ионосферной плазмы на границе плазмосферы.

В работах Mishin [2013] и Mishin et al. [2017] предложена модель короткого замыкания, согласно которой повышенная турбулентность плазмы в канале ПД приводит к аномальному удельному сопротивлению контура и магнитной диффузии, как в проблеме плазмойд-магнитный барьер. Короткое замыкание происходит, когда плотность холодной плазмы превышает критическое значение и поле поляризации на фронте замыкается, так что горячие электроны задерживаются, а горячие ионы еще могут двигаться внутрь. Следовательно, канал ПД можно представить как турбулентный плазмосферный пограничный слой с неустойчивой смесью горячих ионов и холодной плазмы.

Помимо того, что страты ПД и мелкомасштабные неоднородности внутри ПД могут формироваться по вышеуказанным механизмам, но на меньших пространственных масштабах, формирование структур подобного размера может быть связано с мелкомасштабным взаимодействием волна–частица. Кроме того, данные неоднородности могут быть вызваны плазменными неустойчивостями, генерируемыми сверхзвуковым потоком частиц в ионосфере, например, такими как неустойчивость Фарли–Бунемана [Farley, 1963]. Также градиентная дрейфовая неустойчивость [Kadomtsev, 1965; Rathod et al., 2021; Mishin and Blaunstein, 2008], неустойчивость ионного фрикционного нагрева [Keskinen et al., 2004] и неустойчивость ионосферной обратной связи [Watanabe, 2010] могут вызывать плазменные неоднородности внутри страт ПД.

На сегодняшний день нет однозначных и убедительных данных наблюдений, чтобы прямо подтвердить или опровергнуть какой-либо из вышеупомянутых механизмов возникновения ПД

во время геомагнитных возмущений. Вполне возможно, что разные события ПД вызываются разными движущими силами или что во время ПД может каким-то образом сосуществовать смесь различных факторов. Помимо этого, вероятно, что разные механизмы могут быть ответственны за неоднородности различных масштабов внутри ПД. Вопрос физического механизма возникновения ПД, а также мелкомасштабных структур внутри ПД (СПД) остается открытым и требует дальнейших теоретических и экспериментальных исследований.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты представленного исследования мелкомасштабной структуры ПД следующие.

– Рассмотрено несколько случаев ПД. Определено, что каждый из рассмотренных ПД является СПД, что на данной выборке подтверждает предположение о том, что любой ПД является стратифицированным.

– Показано, что вейвлет-преобразование является удобным инструментом для исследования внутренней мелкомасштабной структуры как СПД в целом, так и составляющих его страт ПД. По спектрограммам мощности вейвлет-преобразования наблюдаются мелкие страты ПД.

– На спектрограммах мощности вейвлет-преобразования электронной температуры, как правило, лучше заметны мелкомасштабные неоднородности внутри ПД, чем по спектрограммам электронной концентрации.

– Минимальный размер неоднородностей температуры и концентрации электронов внутри страт ПД варьируется от нескольких километров до десятков метров.

БЛАГОДАРНОСТИ

Данные NorSat-1 доступны на сайте (<http://tid.uio.no/plasma/norsat>). Данные миссии DMSP можно загрузить с веб-сайта NOAA (<https://satdat.ngdc.noaa.gov/dmsp/data/>).

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-22-00133.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

– Бондарь Е.Д., Халипов В.Л., Степанов А.Е. Характеристики поляризационного джета по измерениям на субавроральных станциях Якутск и Подкаменная Тунгуска // Солнечно-земная физика. № 8. С. 143–144. 2005.

– Головачанская И.В., Козелов Б.В., Дэспирак И.В. Исследование широкополосной ELF турбулентности по данным спутника FAST // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 52. № 4. С. 501–509. 2012.

– Дремин И.М., Иванов О.В., Нечитайло В.А. Вейвлеты и их использование // УФН. Т. 171 С. 465–501. 2001.

– 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. Т. 7. № 1. С. 21–33. 2021a. <https://doi.org/10.12737/szf-71202103>

– 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 // Космич. исслед. Т. 59. № 6. С. 489–497. 2021b.

– Степанов А.Е., Халипов В.Л., Голиков И.А., Бондарь Е.Д. Поляризационный джет: узкие и быстрые дрейфы субавроральной ионосферной плазмы. Якутск: издательский дом СВФУ, 72 с. 2017.

– Халипов В.Л., Степанов А.Е., Котова Г.А., Бондарь Е.Д. Вариации положения поляризационного джета и границы инжекции энергичных ионов во время суббури // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 56. № 2. С. 187–193. 2016a. <https://doi.org/10.7868/S0016794016020085>

– Халипов В.Л., Степанов А.Е., Котова Г.А. и др. Вертикальные скорости дрейфа плазмы при наблюдении поляризационного джета по наземным доплеровским измерениям и данным дрейфометров на спутниках DMSP // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 56. № 5. С. 568–578. 2016b. <https://doi.org/10.7868/S0016794016050060>

– Чернышов А.А., Могилевский М.М., Козелов Б.В. Фрактальный подход к описанию авроральной области // Физика плазмы. Т. 39. № 7. С. 636–646. 2013. <https://doi.org/10.7868/S0367292113060024>

– Чугунин Д.В., Чернышов А.А., Моисеенко И.Л., Викторов М.Е., Могилевский М.М. Мониторинг области ускорения электронов при помощи аврорального километрового радиоизлучения // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 60. № 5. С. 566–575. 2020.

– Ahmed M., Sagalyn R.C., Wildman P.J.L., Burke W.J. Topside ionospheric trough morphology: occurrence frequency and diurnal, seasonal and altitude variations // J. Geophys. Res. V. 84. № 2. P. 489. 1979.

– Anderson P.C., Heelis R.A., Hans W.B. The ionospheric signatures of Rapid Subauroral Ion Drifts // J. Geophys. Res. V. 96. № A4. P. 5785–5792. 1991. <https://doi.org/10.1029/91JA02651>

– Anderson P.C., Hanson W.B., Heelis R.A., Craven J.D., Baker D.N., Frank L.A. A proposed production model of rapid subauroral ion drifts and their relationship to substorm evolution // J. Geophys. Res. V. 98. № A4. P. 6069–6078. 1993. <https://doi.org/10.1029/92JA01975>

– Chernyshov A.A., Mogilevsky M.M., Kozelov B.V. Use of fractal approach to investigate ionospheric conductivity in

- the auroral zone // *J. Geophys. Res.* V. 118. № 7. P. 4108–4118. 2013.
<https://doi.org/10.1002/jgra.50321>
- Chernyshov A.A., Kozelov B.V., Mogilevsky M.M. Study of auroral ionosphere using percolation theory and fractal geometry // *J. Atmos. Sol-Terr. Phys.* V. 161. P. 127–133. 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.06.013>
- Chernyshov A.A., Chugunin D.V., Frolov V.L., Clausen L.B.N., Miloch W.J., Mogilevsky M.M. In situ observations of ionospheric heating effects: First results from a joint SURA and NorSat-1 experiment // *Geophys. Res. Lett.* V. 47. № 13. e2020GL088462. 2020.
<https://doi.org/10.1029/2020GL088462>
- De Keyser J. Formation and evolution of subauroral ion drifts in the course of a substorm // *J. Geophys. Res.* V. 104. № A6. P. 12339–12349. 1999.
<https://doi.org/10.1029/1999JA900109>
- De Keyser J., Roth M., Lemaire J. The magnetospheric driver of subauroral ion drifts // *Geophys. Res. Lett.* V. 25. № 10. P. 1625–1628. 1998.
<https://doi.org/10.1029/98GL01135>
- Farley D.T. Two-stream plasma instability as a source of irregularities in the ionosphere // *Phys. Rev. Lett.* V. 10. № 7. P. 279–282. 1963.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.10.279>
- Figueiredo S., Karlsson T., Marklund G. Investigation of subauroral ion drifts and related field-aligned currents and ionospheric Pedersen conductivity distribution // *Ann. Geophysicae.* V. 22. № 3. P. 923–934. 2004.
<https://doi.org/10.5194/angeo-22-923-2004>
- Foster J.C., Vo H.B. Average characteristics and activity dependence of the subauroral polarization stream // *J. Geophys. Res.* V. 107. № A12. P. 1475. 2002.
<https://doi.org/10.1029/2002JA009409>
- Galperin Y.I., Ponomarev V.N., Zosimova A.G. Plasma convection in the polar ionosphere // *Ann. Geophys.* V. 30. № 1. P. 1–7. 1974.
- Galperin Y.I. Polarization jet: Characteristics and a model // *Ann. Geophysicae.* V. 20. № 3. P. 391–404. 2002.
<https://doi.org/10.5194/angeo-20-391-2002>
- Haar A. Zur Theorie der orthogonalen Functionsysteme // *Mathematische Annalen.* V. 69. P. 331–371. 1910.
- He F., Zhang X., Chen B. *et al.* Plasmaspheric trough evolution under different conditions of subauroral ion drift // *Sci. China Technol. Sc.* V. 55. P. 1287–1294. 2012.
<https://doi.org/10.1007/s11431-012-4781-1>
- Hoang H., Clausen L.B.N., Roed K., Bekkeng T.A., Trondsen E., Lybekk B., Moen J.I. The multi-needle Langmuir probe system on board NorSat-1 // *Space Sci. Rev.* V. 214. № 4. P. 75. 2018.
<https://doi.org/10.1007/s11214-018-0509-2>
- Horvath I., Lovell B. C. Complex sub-auroral flow channel structure formed by double-peak sub-auroral ion drifts (DSAD) and abnormal sub-auroral ion drifts (ASAD) // *J. Geophys. Res. – Space.* V. 126. e2020JA028475. 2021.
<https://doi.org/10.1029/2020JA028475>
- Kadomtsev B.B. Plasma turbulence. London: Academic Press, 149 p. 1965.
- Karlsson E., Marklund G., Blomberg L., Malkki A. Subauroral electric fields observed by Freja satellite: A statistical study // *J. Geophys. Res.* V. 103. P. 4327–4341. 1998.
<https://doi.org/10.1029/97JA00333>
- Keskinen M.J., Basu S., Basu S. Midlatitude sub-auroral ionospheric small scale structure during a magnetic storm // *Geophys. Res. Lett.* V. 31. № 9. L09811. 2004.
<https://doi.org/10.1029/2003GL019368>
- 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 // *J. Geophys. Res. – Space.* V. 124. P. 6212–6225. 2019.
<https://doi.org/10.1029/2019JA026698>
- Lund E.J. On the dissipation scale of broadband ELF waves in the auroral region // *J. Geophys. Res.* V. 115. P. A01201. 2010.
<https://doi.org/10.1029/2009JA014545>
- Mishin E.V., Blaunstein N. Irregularities within Subauroral Polarization Stream-Related Troughs and GPS Radio Interference at Midlatitudes // *Midlatitude ionospheric dynamics and disturbances.* V. 181. P. 291–295. 2008.
<https://doi.org/10.1029/181GM26>
- Mishin E.V. Interaction of substorm injections with the subauroral geospace: 1. Multispacecraft observations of SAID // *J. Geophys. Res. – Space.* V. 118. № 9. P. 5782–5796. 2013.
<https://doi.org/10.1002/jgra.50548>
- Mishin E.V., Nishimura Y., Foster J. SAPS/SAID revisited: A causal relation to the substorm current wedge // *J. Geophys. Res. – Space.* V. 122. № 8. P. 8516–8535. 2017.
<https://doi.org/10.1002/2017JA024263>
- Moffett R.J., Quegan S. The mid-latitude trough in the electron concentration of the ionospheric F-layer: a review of observations and modelling // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 45. № 5. P. 315–343. 1983.
[https://doi.org/10.1016/S0021-9169\(83\)80038-5](https://doi.org/10.1016/S0021-9169(83)80038-5)
- Muldrew D.B. F-layer ionization troughs deduced from Alouette data // *J. Geophys. Res.* V. 70. № 11. P. 2635–2650. 1965.
<https://doi.org/10.1029/JZ070i011p02635>
- Rathod C., Srinivasan B., Scales W., Kunduri B. Investigation of the gradient drift instability as a cause of density irregularities in subauroral polarization streams // *J. Geophys. Res. – Space.* V. 126. № 5. e2020JA029027. 2021.
<https://doi.org/10.1029/2020JA029027>
- Rich F.J. Users guide for the topside ionospheric plasma monitor (SSIES, SSIES-2 and SSIES-3) on spacecraft of the defense meteorological satellite program (DMSP) // *Environmental Research Papers.* № 1151. P. PL-TR-94-2187. 1994.
- Sinevich A.A., Chernyshov A.A., Chugunin D.V., Oinats A.V., Clausen L.B.N., Miloch W.J. *et al.* Small-scale irregularities within polarization Jet/SAID during geomagnetic activity // *Geophys. Res. Lett.* V. 49. № 8. e2021GL097107. 2022.
<https://doi.org/10.1029/2021GL097107>
- Sinevich A.A., Chernyshov A.A., Chugunin D.V., Clausen L.B.N., Miloch W.J., Mogilevsky M.M. Stratified Subauroral Ion Drift (SSAID) // *J. Geophys. Res. – Space.*

V. 128. № 3. e2022JA031109. 2023.

<https://doi.org/10.1029/2022JA031109>

— *Smiddy M., Kelley M.C., Burke W.J., Rich R., Sagalyn R., Shuman B., Hays R., Lai S.* Intense poleward directed electric fields near the ionospheric projection of the plasma-pause // *Geophys. Res. Lett.* V. 4. № 11. P. 543–546. 1977.

— *Southwood D., Wolf R.* An assessment of the role of precipitation in magnetospheric convection // *J. Geophys. Res.* V. 83. P. 5227–5232. 1978.

<https://doi.org/10.1029/ja083ia11p05227>

— *Spiro R.W., Heelis R.A., Hanson W.B.* Rapid subauroral ion drifts observed by Atmosphere Explorer C // *Geophys. Res. Lett.* V. 6. № 8. P. 657–660. 1979.

<https://doi.org/10.1029/GL006i008p00657>

— *Watanabe T.H.* Feedback instability in the magnetosphere-ionosphere coupling system: Revisited // *Phys.*

Plasmas. V. 17. № 2. P. 022904. 2010.

<https://doi.org/10.1063/1.3304237>

— *Wang H., Lühr H., Ritter P., Kervalishvili G.* Temporal and spatial effects of subauroral polarization streams on the thermospheric dynamics // *J. Geophys. Res.* V. 117. № A11. 2012.

<https://doi.org/10.1029/2012JA018067>

— *Yu Y., Jordanova V.K., Zou S., Heelis R., Ruohoniemi M., Wygant J.* Modeling subauroral polarization streams during the 17 March 2013 storm // *J. Geophys. Res. — Space.* V. 120. № 3. P. 1738–1750. 2015.

<https://doi.org/10.1002/2014JA020371>

— *Zheng Y., Brandt P.C., Lui A.T., Fok M.-C.* On ionospheric trough conductance and subauroral polarization streams: Simulation results // *J. Geophys. Res.* V. 113. № A4. A04209. 2008.

<https://doi.org/10.1029/2007JA012532>