

УДК 550.388.2

ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЙ ДЖЕТ И ПЛАЗМЕННЫЕ НЕОДНОРОДНОСТИ РАЗЛИЧНОГО МАСШТАБА

© 2024 г. А. А. Синеви^{1, 2, *}, А. А. Чернышов¹, Д. В. Чугунин¹, В. Я. Милох³,
М. М. Могилевский¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки “Институт космических исследований
Российской академии наук”, Москва, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки “Институт земного магнетизма, ионосферы
и распространения радиоволн имени Н. В. Пушкова Российской академии наук”, Москва, Россия

³Университет Осло, Осло, Норвегия

*E-mail: sinevich.aa@gmail.com

Поступила в редакцию 24.08.2023

После доработки 13.11.2023

Принята к публикации 30.11.2023

Представлены результаты исследования внутренней мелкомасштабной структуры поляризационного джета с использованием различных спутниковых данных. Подтвержден минимальный размер неоднородностей и типичный внутренний состав стратифицированного поляризационного джета. Обнаружена двухпиковая структура, которая представляет собой две крупных страты поляризационного джета. Показан сдвиг страт концентрации и температуры электронов по широте относительно друг друга.

DOI: 10.31857/S0367676524030139, EDN: QLQLQU

ВВЕДЕНИЕ

Поляризационный джет (ПД) (другое название в научной литературе — SAID — subauroral ion drift) — это узкая (1° – 2° широты) полоса быстрого дрейфа на запад ионов ионосферной плазмы в области проекции плазмапаузы, возникающая в субавроральной ионосфере на высотах F-слоя. Впервые ПД был зарегистрирован на советском спутнике “Космос-184” в 1973 г. [1]. В результате дальнейших исследований с использованием различных спутниковых миссий и наземных наблюдений определено, что ПД возникает от 18 MLT (Magnetic Local Time — местное магнитное время) до 02 MLT экваториальнее границы авроральной зоны [2, 3]. Во время геомагнитной активности происходят изменения магнитосферно-ионосферных связей и всей токовой системы, приводящие к возникновению различных явлений, таких как авроральные сияния, радиоаврора, геомагнитно-индуцированные токи, широкополосная низкочастотная турбулентность, авроральное километровое радиоизлучение, ионосферные возмущения, которые вызывают радио- и радиолокационные мерцания, а также к появлению поляризационного джета [4–8]. Хорошо известно из литературы, что происходит рост вероятности возникновения ПД с увеличением индексов AE и Kp [2, 3]. Последующие научные исследования с участием

разнообразных космических миссий и данных наземных радаров позволили выявить основные крупномасштабные черты в формировании и развитии ПД, также были предложены различные физические механизмы, объясняющие появление ПД во время геомагнитных возмущений [3, 9–14]. Однако многие спутники не были оснащены необходимыми приборами для более глубокого изучения характеристик ионосферной плазмы внутри ПД или научная аппаратура на борту спутников не позволяла проводить измерения с высоким временным разрешением. Мелкомасштабные процессы внутри ПД мало исследованы, и здесь остается много открытых вопросов.

Ранее с использованием данных спутника NorSat-1 был проведен ряд исследований [15–18] касательно изучения мелкомасштабной структуры ПД. Особенностью спутника NorSat-1 является высокая частота опроса установленного на нем многогольного зонда Ленгмюра — до 1 кГц, позволяющая производить измерения параметров плазмы с высоким временным и пространственным разрешением [19, 20]. Значительно более высокая пространственная частота опроса спутника NorSat-1 позволяет исследовать внутреннюю мелкомасштабную структуру настолько узкого (1° – 2° широты) по широте ионосферного явления. Исследования показали наличие как мелкомасштабных (десятки—сотни метров), так и крупномасштабных (десятки

километров) неоднородностей параметров плазмы внутри ПД [15, 16]. Кроме того, был впервые обнаружен новый тип ПД — стратифицированный поляризационный джет (СПД), представляющий собой ПД, состоящий из нескольких страт [18]. Определено типичное количество страт СПД, пространственные размеры страт, а также поведение неоднородностей параметров плазмы внутри них с развитием геомагнитной активности [17, 18].

В рамках настоящей работы для исследования ПД и плазменных неоднородностей различного масштаба используются данные измерений спутника NorSat-1. Также для явного подтверждения того, что обнаруженное по данным NorSat-1 явление представляет собой ПД, используются спутниковые наблюдения DMSP F-16, который оборудован прибором для измерения скоростей дрейфа ионов. Цель данной работы — исследовать мелко-масштабную структуру ПД по данным с высоким пространственным разрешением, используя новые случаи обнаружения ПД и новые методы анализа результатов измерений с учетом ранее полученных результатов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

В данном исследовании мы рассматриваем геомагнитное событие 14.03.2021. На рис. 1 показана эволюция индексов SME и Dst, характеризующих геомагнитную обстановку, с 18 UT 13.03.2021 до

04 UT 14.03.2021. Моменты времени пересечения ПД спутниками DMSP F-16 (в 02:02 UT) и NorSat-1 (в 02:40 UT) отмечены синей и красной звездочкой соответственно. Индекс SME, характеризующий авроральный электроджет, составляет 600—700 нТл в 02 UT, что свидетельствует об умеренно высокой геомагнитной активности в авроральных и субавроральных широтах. Во время данного геомагнитного события магнитная компонента B_z межпланетного магнитного поля была отрицательной, также в это время регистрировался быстрый солнечный ветер ($V_x \sim -550$ км/с). Отметим, что наблюдалось постепенное падение геомагнитного индекса Dst на протяжении достаточно длительного времени, а в момент обнаружения ПД имело место локальное снижение Dst с ~02:00 UT 14.03.2021 (см. рис. 1).

На рис. 2 представлены результаты измерений спутника DMSP F-16 во время геомагнитного события 14.03.2021. Как видно из верхней панели рисунка, 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), пространственно совпадающий 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.

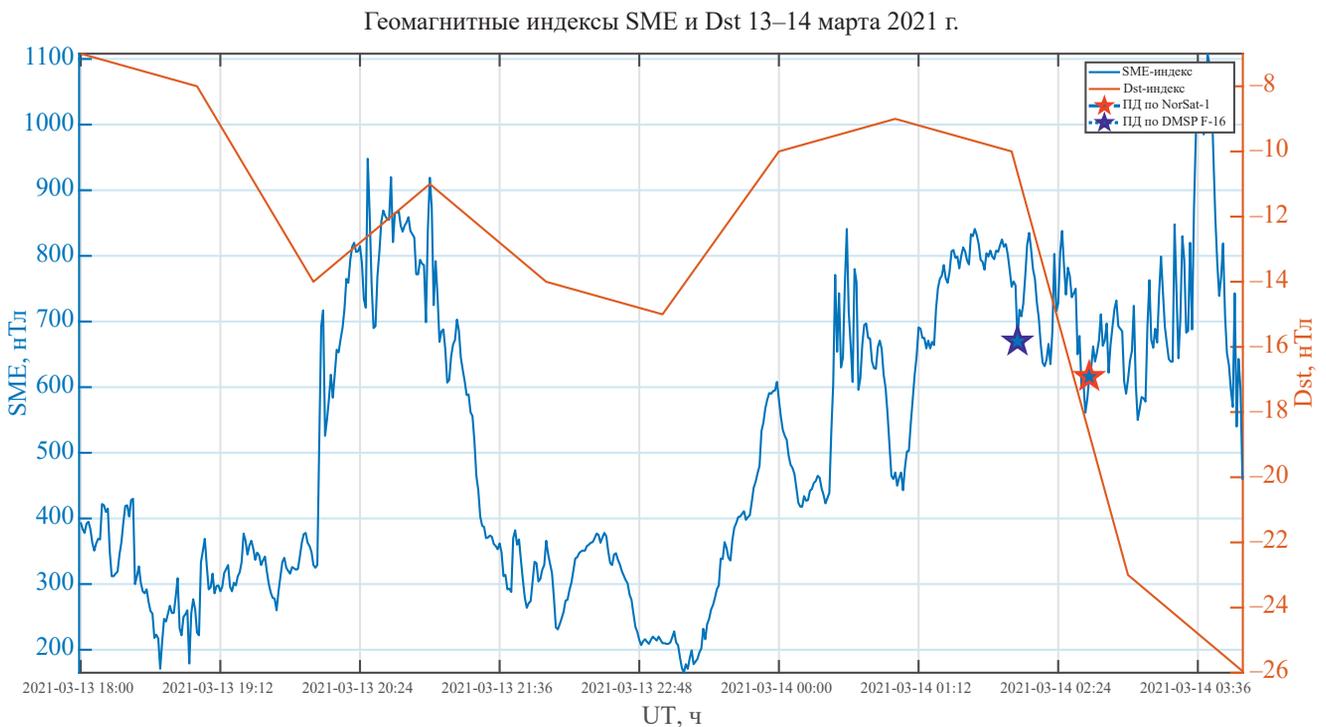


Рис. 1. Развитие индексов геомагнитной активности SME (синяя линия) и Dst (красная линия) от времени UT во время рассматриваемого геомагнитного события с 18 UT 13.03.2021 до 04 UT 14.03.2021. Синей и красной звездами отмечены моменты пересечения ПД спутниками DMSP F-16 (в 02:02 UT) и NorSat-1 (в 02:40 UT) соответственно.

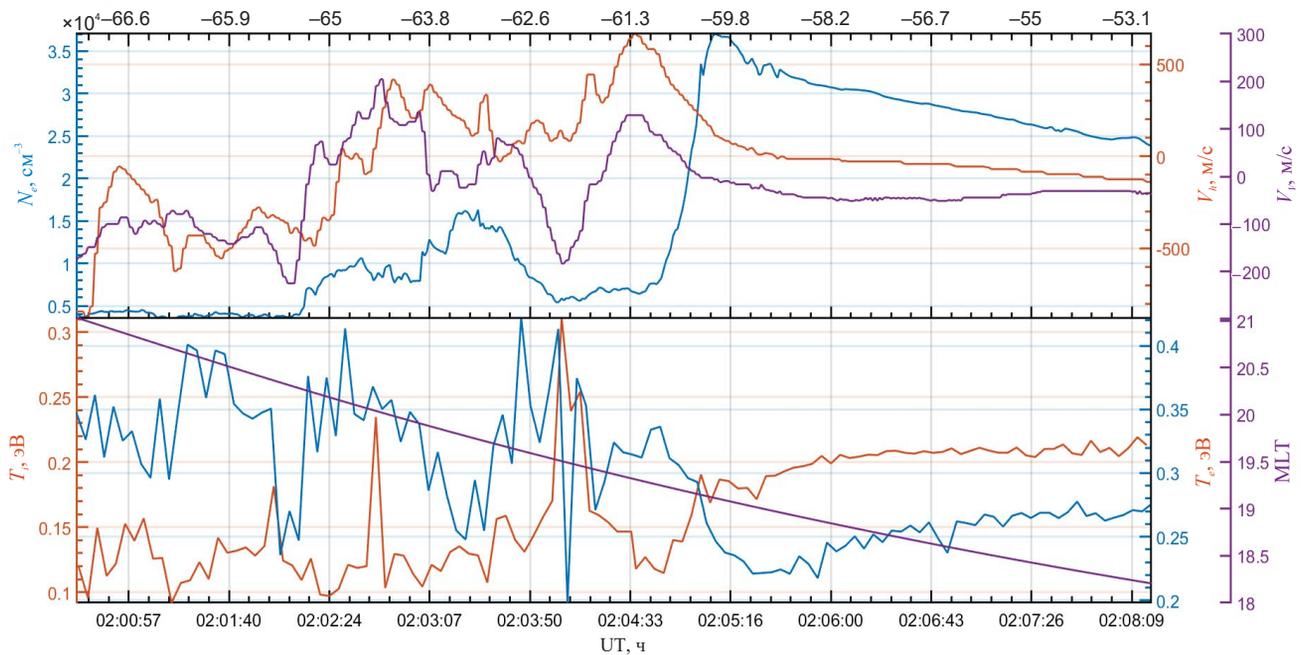


Рис. 2. Верхняя панель — изменение концентрации электронов (синяя линия), горизонтальной скорости дрейфа ионов (красная линия) и вертикальной скорости дрейфа ионов (фиолетовая линия) от геомагнитной широты (в координатах AACGM — Altitude Adjusted Corrected Geomagnetic) (верхняя ось абсцисс) и времени UT (нижняя ось абсцисс) по данным спутника DMSP F-16 на высоте ~ 850 км во время геомагнитного события 14.03.2021 в 02 UT; нижняя панель — изменение MLT (фиолетовая линия), температуры электронов (синяя линия) и температуры ионов (красная линия) по данным спутника DMSP F16.

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 температуры 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 у разных авторов составляет либо 500 м/с и выше [2], либо 1000 м/с и выше [21]. Таким образом, горизонтальная скорость дрейфа ионов, равная 600 м/с, удовлетворяет критерию возникновения ПД из статьи [2]. Кроме того, о присутствии ПД на рассматриваемых широтах говорит пространственное совпадение провала электронной концентрации с пиком горизонтальных скоростей дрейфа ионов [2, 21] и вертикальных скоростей дрейфа ионов [22]. Кроме того, пространственно совпадающее положение пика дрейфов ионов и пика ионных и электронных температур также свойственно ПД [21]. Поскольку ПД не является локальным явлением по долготе и растянут вдоль широты с 18 до 02 ч MLT [2], присутствие ПД на 19 MLT подтверждает присутствие ПД на 00 MLT — долготе солнечно-синхронной орбиты спутника NorSat-1 во время геомагнитного события 14.04.2021. Кроме того, согласно работам [3,

23], средняя геомагнитная широта ПД уменьшается с увеличением MLT. Следует отметить, что по данным DMSP F-16 ПД расположен в южном полушарии. Как известно из исследований на основе спутниковых данных и данных наземных радаров [10, 24, 25], если ПД присутствует в одном полушарии, то он также одновременно наблюдается в другом полушарии на магнитно-сопряженных широтах.

На рис. 3 показаны результаты измерений спутника NorSat-1 во время геомагнитной активности 14.03.2021 в 02 UT. На участке геомагнитных широт 59.9° — 58.3° концентрация электронов ниже фонового уровня в 2.5 раза, и внутри данного провала также заметен подъем температуры электронов, что позволяет утверждать, что на данном участке располагается ПД в субавроральной ионосфере. По температуре внутри ПД наблюдается два отдельных пика. Схожие пики температуры электронов по данным NorSat-1 ранее были обнаружены во время геомагнитного события 20.04.2018 [15, 16] и в дальнейшем интерпретированы как крупные страты стратифицированного поляризованного джета (СПД) [18]. Далее в настоящем исследовании ПД, обнаруженный во время рассматриваемой геомагнитной активности, интерпретируется как СПД.

На средней панели рис. 3 показана спектрограмма мощности Фурье-преобразования

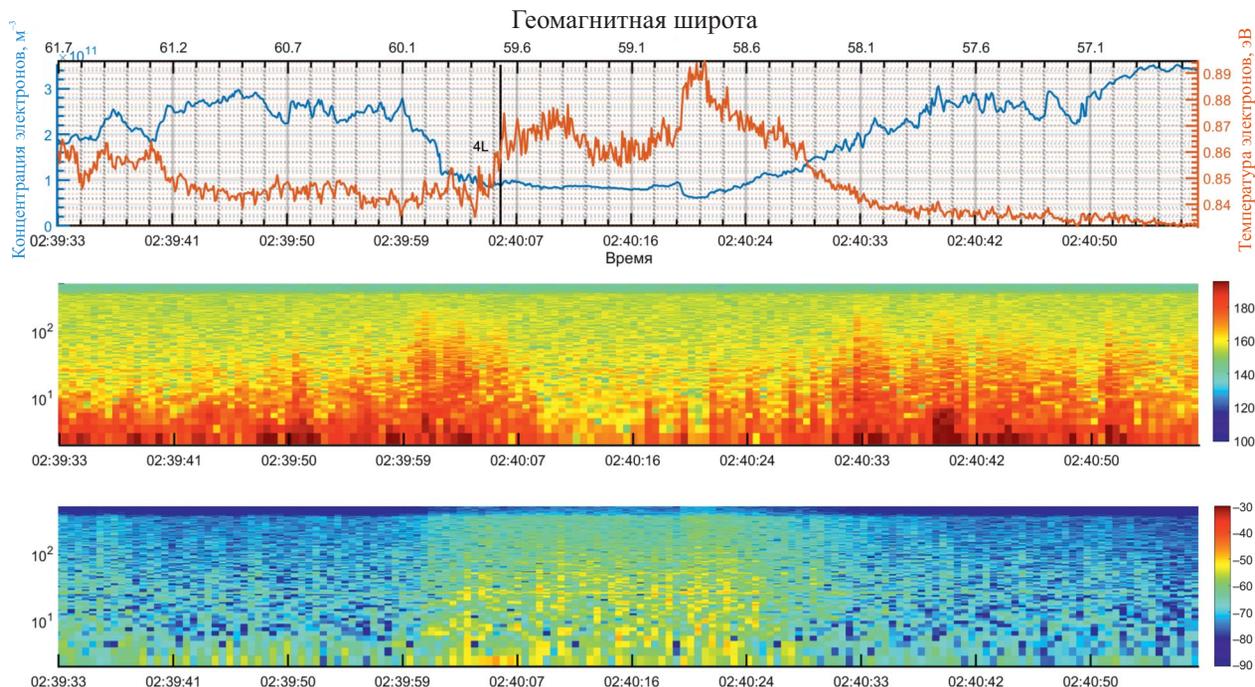


Рис. 3. Верхняя панель — изменение концентрации (синяя линия) и температуры (красная линия) электронов от геомагнитной широты (дипольная модель, 110 км) (верхняя ось абсцисс) и времени UT (нижняя ось абсцисс) по данным спутника NorSat-1 на высоте ~600 км во время геомагнитного события 14.03.2021 в 02 UT; средняя панель — спектрограмма мощности Фурье-преобразования электронной концентрации; нижняя панель — спектрограмма мощности Фурье-преобразования электронной температуры.

концентрации электронов. По спектрограмме заметно, что минимальный масштаб неоднородностей концентрации электронов внутри СПД больше (~150 м), чем в полярной и экваториальной от СПД областях (менее 100 м). По спектрограмме электронной температуры (нижняя панель рис. 3) заметно обратное — размер неоднородностей температуры электронов внутри СПД меньше, чем за его пределами. Минимальный размер неоднородностей температуры электронов внутри СПД составляет несколько десятков метров. Ранее на основании данных NorSat-1 во время геомагнитного события 20.04.2018 был определен минимальный размер неоднородностей концентрации и температуры электронов внутри ПД — десятки-сотни метров [15, 17].

Для исследования внутренней структуры ПД мы разработали и применили метод обработки спутниковых данных, который позволяет обнаруживать неоднородности параметров плазмы и определять пространственные размеры этих неоднородностей на основе нахождения $\Delta N/N$ и $\Delta T/T$:

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{N - SMA(N)}{SMA(N)};$$

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

где *SMA* — простое скользящее среднее с окном Δ . Параметр $\Delta N/N(\Delta T/T)$ показывает отклонение концентрации (температуры) электронов от среднего значения на различных масштабах — от 0.01° до 1° с шагом в 0.01° широты. Другими словами, рассчитывается отклонение значения концентрации (температуры) электронов от скользящего среднего с пространственным окном 0.01°, 0.02° и так далее до 1°. В результате получается трехмерный массив данных (широта, размер окна, отклонение от среднего) и в итоге строится двумерное изображение, где по оси абсцисс отложена широта (время UT), по оси ординат — размер окна, а цветовой шкалой показано относительное отклонение от скользящего среднего. Таким образом, данный параметр позволяет обнаружить неоднородности плазменных характеристик плазмы внутри ПД и затем определить их пространственные размеры.

На рис. 4 показано изменение параметров $\Delta N/N$ и $\Delta T/T$ во время геомагнитного события 14.03.2021 в 02 UT. На верхней панели рисунка по изменению параметра $\Delta N/N$ внутри СПД на широтах ~58.7° и ~57.6° видны две крупные страты ПД электронной концентрации размером в ~0.3°, а также несколько мелких страт ПД размером менее 0.1° широты. Согласно [18] СПД состоит из 2—4 крупных страт размером 0.2—0.3° широты и от нескольких единиц до нескольких десятков мелких страт размером менее 0.1°. Рассматриваемый в текущей работе СПД

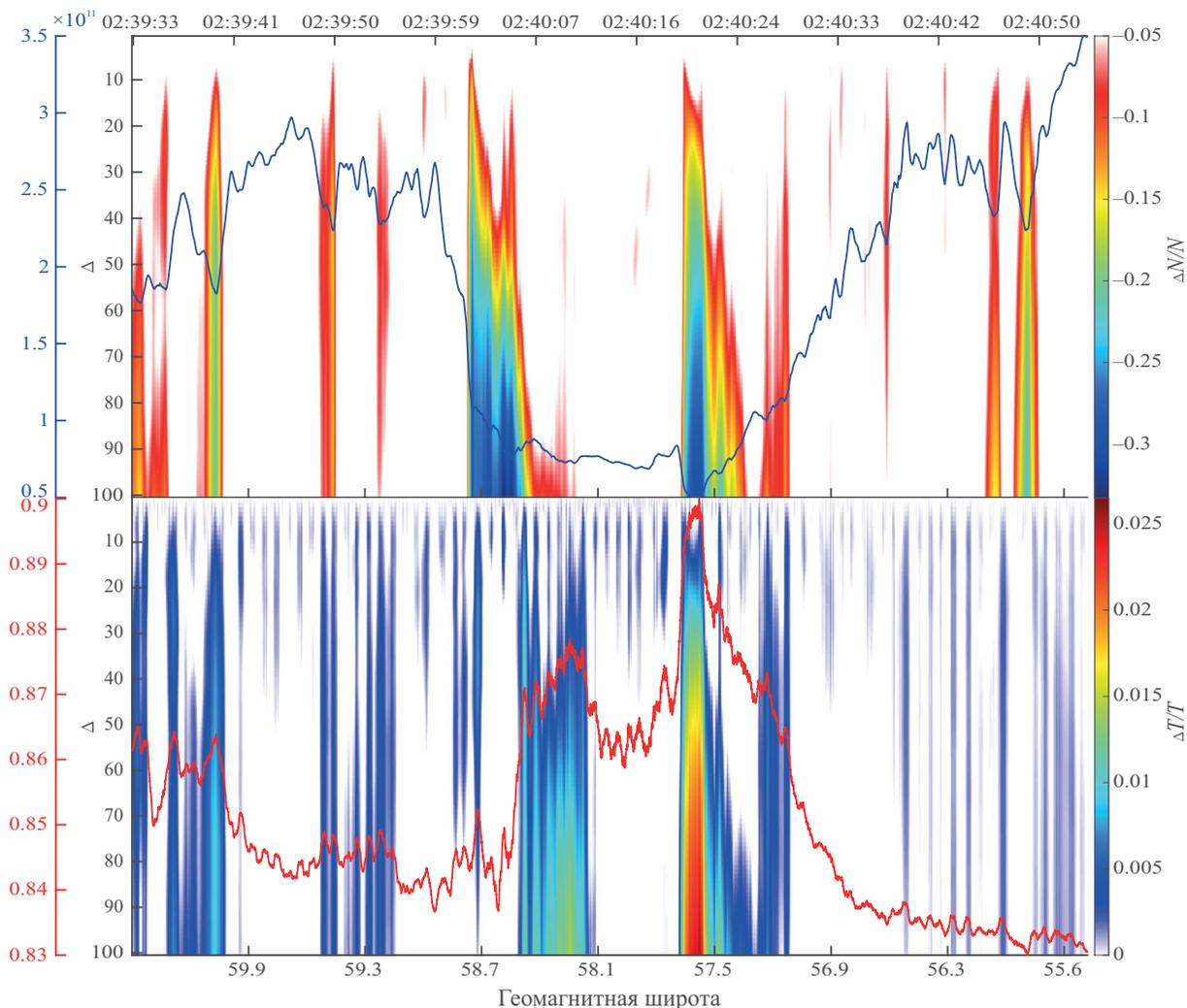


Рис. 4. Верхняя панель — изменение электронной концентрации (синяя линия) и параметра $\Delta N/N$ (цветовая шкала) от геомагнитной широты (дипольная модель, 110 км) (нижняя ось абсцисс) и времени UT (верхняя ось абсцисс) по данным спутника NorSat-1 на высоте ~ 600 км во время геомагнитного события 14.03.2021 в 02 UT; нижняя панель — изменение электронной температуры (красная линия) и параметра $\Delta T/T$ (цветовая шкала) по данным спутника NorSat-1.

удовлетворяет указанным критериям. На нижней панели рисунка по изменению параметра $\Delta T/T$ внутри СПД видно, что 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. Согласно графику Dst на рис. 1 в момент обнаружения ПД геомагнитная активность

снижалась, в результате чего расположение экваториальной границы аврорального овала сдвинулось в сторону полюса. Таким образом, в сторону полюса сдвинулась полярная граница ПД. Сдвиг полосы дрейфа к полюсу отразился на положении провала электронной концентрации (см. рис. 4).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Во время геомагнитной активности 13.03.2021 по данным спутников DMSP F-16 и NorSat-1 обнаружен СПД. С использованием данных высокой пространственной частоты измерений (до 1 кГц) на спутнике NorSat-1 исследована внутренняя мелко-масштабная структура СПД и получены следующие результаты: на примере рассмотренного случая подтверждены ранее найденные особенности внутренней мелко-масштабной структуры ПД, такие

как минимальный масштаб неоднородностей параметров плазмы и типичный внутренний состав СПД; обнаружена двухпиковая структура ПД, которая представляет собой две крупных страты электронной концентрации и температуры, составляющих СПД; показано, что минимальный масштаб неоднородностей концентрации электронов внутри рассмотренного СПД составляет ~150 м, а температуры электронов — несколько десятков метров; показано, что страта электронной температуры в рассматриваемом случае пространственно не совпадает со стратой электронной концентрации и сдвинута по широте.

Мы благодарим Мировой центр данных по геомагнетизму в Киото [<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>] и организации и национальные агентства, входящие в SuperMAG [<http://supermag.jhuapl.edu/info>], за предоставление данных по индексам геомагнитной активности. Данные NorSat-1 доступны на сайте [<http://tid.uio.no/plasma/norsat>]. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-22-00133).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Galperin Y.I., Ponomarev V.N., Zosimova A.G. // Ann. Geophys. 1974. V. 30. No. 1. P. 1.
2. Spiro R.W., Heelis R.A., Hanson W.B. // Geophys. Res. Lett. 1979. V. 6. No. 8. P. 657.
3. Karlsson E., Marklund G., Blomberg L., Malkki A. // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. P. 4327.
4. Чернышов А.А., Могилевский М.М., Чугунин Д.В., Колпак В.И. // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 3. С. 370; Chernyshov A.A., Mogilevsky M.M., Chugunin D.V., Kolpak V.I. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. V. 86. No. 3. P. 295.
5. Селиванов В.Н., Сахаров Я.А. // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 3. С. 416; Selivanov V.N., Sakharov Ya.A. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 3. P. 303.
6. Козелов Б.В., Ролдугин А.В. // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 3. С. 366; Kozelov B.V., Roldugin A.V. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 3. P. 256.
7. Чернышов А.А., Чугунин Д.В., Могилевский М.М. // Письма в ЖЭТФ. 2022. Т. 115. № 1. С. 28.
8. Белаховский В.Б., Джин Я., Милош В. // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 3. С. 428; Belakhovsky V.B., Jin Y., Miloch V. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. V. 86. No. 3. P. 348.
9. He F., Zhang X., Chen B. et al. // Sci. China Technol. Sci. 2012. V. 55. P. 1287.
10. Mishin E.V. // J. Geophys. Res. Space. 2013. V. 118. No. 9. P. 5782.
11. Mishin E.V., Nishimura Y., Foster J. // J. Geophys. Res. Space. 2017. V. 122. No. 8. P. 8516.
12. Mishin E.V., Streltsov A.V. // Geophys. Res. Lett. 2023. V. 50. Art. No. e2023GL102956.
13. Степанов А.Е., Халипов В.Л., Голиков И.А., Бондарь Е.Д. Поляризаационный джет: узкие и быстрые дрейфы субавроральной ионосферной плазмы. Якутск: Изд. дом СВФУ, 2017. 72 с.
14. Бондарь Е.Д., Халипов В.Л. // Солн.-земн. физ. 2005. № 8. С. 143.
15. Синевич А.А., Чернышов А.А., Чугунин Д.В. и др. // Солн.-земн. физ. 2021. Т. 7. № 1. С. 21.
16. Синевич А.А., Чернышов А.А., Чугунин Д.В. и др. // Косм. иссл. 2021. Т. 59. № 6. С. 489.
17. Sinevich A.A., Chernyshov A.A., Chugunin D.V. et al. // Geophys. Res. Lett. 2022. V. 49. No. 8. Art. No. e2021GL097107.
18. Sinevich A.A., Chernyshov A.A., Chugunin D.V. et al. // J. Geophys. Res. Space. 2023. V. 128. No. 3. Art. No. e2022JA031109.
19. Hoang H., Clausen L.B.N., Roed K. et al. // Space Sci. Rev. 2018. V. 214. No. 4. P. 75.
20. Chernyshov A.A., Chugunin D.V., Frolov V.L. et al. // Geophys. Res. Lett. 2020. V. 47. No. 13. Art. No. e2020GL088462.
21. Anderson P.C., Heelis R.A., Hans W.B. // J. Geophys. Res. 1991. V. 96. No. A4. P. 5785.
22. Халипов В.Л., Степанов А.Е., Котова Г.А. и др. // Геомагн. и аэронаом. 2016. Т. 56. № 5. С. 568; Khalipov V.L., Stepanov A.E., Kotova G.A. et al. // Geomagn. Aeronomy. 2016. V. 56. No. 5. P. 535.
23. Foster J.C., Vo H.B. // J. Geophys. Res. 2002. V. 107. No. A12. P. 1475.
24. Kunduri B.S.R., Baker J.B.H., Ruohoniemi J.M. et al. // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. No. A8. Art. No. A08225.
25. Puhl-Quinn P.A., Matsui H., Mishin E.V. et al. // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. No. A5. Art. No. A05219.

Polarization jet/SAID and plasma irregularities of various scales

A. A. Sinevich^{1, 2, *}, A. A. Chernyshov¹, D. V. Chugunin¹, W. J. Miloch³, M. M. Mogilevsky¹

¹*Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997 Russia*

²*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 108840 Russia*

³*University of Oslo, Oslo, 0313 Norway*

**e-mail: sinevich.aa@gmail.com*

The results of a study of the internal small-scale structure of a polarization jet/SAID using high-frequency data from various satellites are presented. The minimum size of irregularities and the typical internal composition of a stratified subauroral ion drift (SSAID) are confirmed. A two-peak structure has been found, which represents two large strata of the polarization jet/SAID. The shift of strata of electron density and temperature in latitude relative to each other is shown.

Keywords: subauroral ionosphere, polarization jet/SAID, small-scale structure