

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ИССЛЕДОВАНИЮ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ДЖЕТА

А.А. Синевич^{1,2}, А.А. Чернышов¹, Д.В. Чугунин¹, М.В. Клименко³, В.А. Панченко²,
Г.А. Якимова³, М.М. Могилевский¹

¹Институт Космических Исследований Российской Академии Наук, Москва, Россия,
sinevich.aa@gmail.com

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

³Западное Отделение ИЗМИРАН, Калининград, Россия

A COMPLEX APPROACH TO THE STUDY OF THE POLARIZATION JET

A.A. Sinevich^{1,2}, A.A. Chernyshov¹, D.V. Chugunin¹, M.V. Klimenko³, V.A. Panchenko²,
G.A. Yakimova³, M.M. Mogilevsky¹

¹Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

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

³West Department of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation,
Kaliningrad, Russia

Аннотация. Поляризационный джет (ПД или SAID — SubAuroral Ion Drift) — явление субавроральной ионосферы, представляющее собой узкую полосу быстрого (до нескольких км/с) западного дрейфа ионов на высотах F-слоя, размер плазменных неоднородностей внутри которой может достигать десятков-сотен метров. Несмотря на то, что такие сильные дрейфы ионов и такая высокая структурированность ионосферной плазмы могут вызывать сбои в работе навигационных систем, внутренняя мелкомасштабная структура ПД на данный момент исследована не до конца. Наиболее полное и глубокое понимание мелкомасштабной структуры ПД даст комплексный подход к исследованию с использованием сочетания одновременных наземных и спутниковых наблюдений субавроральной ионосферы, включая измерения с высокой пространственной частотой. В наших работах впервые использованы результаты одновременных измерений, полученные с помощью различных наземных и спутниковых средств (включая спутники ГНСС), для изучения ПД во время нескольких случаев роста геомагнитной активности. В процессе исследований установлено, что внутри ПД с развитием геомагнитной активности флуктуации параметров плазмы увеличиваются на всех масштабах, при этом растет роль крупномасштабных эффектов. Обнаружен новый тип явлений, названный стратифицированный поляризационный джет (СПД) состоящий из нескольких мелкомасштабных страт, определен типичный размер страт. Было обнаружено влияние СПД на распространение трансionoсферных радиосигналов ГНСС: увеличение показателей фазовых и амплитудных мерцаний, а также потеря захвата сигнала. Выяснено, что страты поляризационного джета и неоднородности параметров плазмы внутри них могут вызывать множественные отражения радиосигнала, которые видны на ионограммах в виде F-рассеяния.

Ключевые слова: поляризационный джет, субавроральный ионный дрейф, субавроральная ионосфера, геомагнитная активность

Abstract. A polarization jet (PJ or SAID — SubAuroral Ion Drift) is a phenomenon of the subauroral ionosphere, which is a narrow band of fast (up to several km/s) westward ion drift at F-layer altitudes, the size of plasma irregularities inside which can reach tens to hundreds of meters. Despite the fact that such strong ion drifts and such highly structured ionospheric plasma can cause malfunctions in the operation of navigation systems, the internal small-scale structure of PJ/SAID has not yet been fully studied. The most complete and in-depth understanding of the small-scale structure of the PJ/SAID will be provided by a complex approach to research using a combination of simultaneous ground-based and satellite observations of the subauroral ionosphere, including measurements with high spatial frequency. Our works are the first to use the results of simultaneous measurements obtained using various ground-based and satellite means (including GNSS satellites) to study PJ/SAID during several cases of increased geomagnetic activity. During our studies, it was established that within the PJ/SAID, with the development of geomagnetic activity, fluctuations of plasma parameters increase on all scales and the role of large-scale effects increases. A new type of phenomena, called a stratified polarization jet (SSAID), consisting of several small-scale strata (PJS, Polarization Jet Strata), was discovered, and the typical size of the strata was determined. The influence of SSAID on the propagation of transionospheric GNSS radio signals was discovered: an increase in phase and amplitude scintillation, as well as loss of lock. It was found that PJS and irregularities of plasma parameters inside them can cause multiple reflections of radiosignals, which are visible in ionograms in the form of F-spread.

Keywords: polarization jet, subauroral ion drift, subauroral ionosphere, geomagnetic activity

ВВЕДЕНИЕ

Субавроральная зона расположена между проекцией положения плазмоспаузы вдоль силовых линий геомагнитного поля и экваториальной границей аврорального овала. Одно из наиболее интересных и малоизученных явлений в этой зоне — появление узких потоков быстрых субавроральных ионов, дрейфующих на запад вблизи проекции плазмоспаузы на высотах в F-области ионосферы.

Это явление было впервые обнаружено по данным советского спутника «Космос-184» и получило название поляризационный джет (ПД) [Galperin et al., 1974]. В научной литературе это явление часто называют также Subauroral Ion Drift (SAID) после статьи Spiro et al., [1979]. Столь узкая полоса дрейфа на высотах в F-области вследствие условий вмороженности плазмы связана со спутниковыми наблюдениями и развитием локальных,

направленных к полюсу электрических полей на экваториальной границе конвекционной зоны. Скорость плазмы в полосе ПД может достигать сверхзвуковых значений выше высот F-слоя.

Хорошо известно, что существование ПД приводит к ряду резких структурных изменений в ионосфере, таких как образование узкого провала в широтном распределении электронной концентрации, нагрев плазмы, появление плазменных неоднородностей разных масштабов, которые влияют на условия распространения радиоволн, тем самым отражая изменения космической погоды. Несмотря на то, что экспериментальные и теоретические исследования ПД ведутся уже несколько десятилетий, его природа остается не до конца понятной, и исследование этого явления остается актуальной задачей в физике ионосферы и магнитосферы. Кроме того, падение плотности ионосферной плазмы внутри поляризационного джета существенно влияет на условия прохождения коротковолнового радиоизлучения, что, в свою очередь, влияет на точность позиционирования навигационных спутников (GPS, ГЛОНАСС, Galileo и др.). Это определяет практическую значимость исследования физических явлений, происходящих в субавроральной ионосфере.

Наиболее полное и глубокое понимание мелко-масштабной структуры ПД даст комплексный подход к исследованию с использованием сочетания одновременных наземных и спутниковых наблюдений субавроральной ионосферы, включая измерения с высокой пространственной частотой. В наших работах впервые использованы результаты одновременных измерений, полученные с помощью различных наземных и спутниковых средств (включая спутники ГНСС), для изучения ПД во время нескольких случаев роста геомагнитной активности.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ

Для комплексного исследования ПД во время геомагнитной активности были использованы данные таких спутников и спутниковых систем как DMSP, Swarm и NorSat-1, а также данные спутников ГНСС (GPS, ГЛОНАСС). Также были использованы такие наземные измерительные средства как ионозонды, сцинтилляционные приемники и радары обратного когерентного рассеяния сети SuperDARN. ПД был исследован во время геомагнитных бурь 2018–2021 гг. Данные были

проанализированы с использованием Фурье- и вейвлет-анализа, а также с помощью нового впервые введенного авторами метода анализа внутренней структуры ПД [Sinevich et al., 2023].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В наших исследованиях по результатам проведенного анализа данных одновременных измерений наземных и спутниковых средств внутри ПД во время различных геомагнитных событий были сделаны следующие выводы:

– Установлено, что внутри ПД с развитием геомагнитной активности флуктуации параметров плазмы увеличиваются на всех масштабах, при этом растет роль крупномасштабных эффектов [Sinevich et al., 2022].

– Обнаружен новый тип явлений, названный стратифицированный поляризационный джет (СПД) состоящий из нескольких мелкомасштабных страт, определен типичный размер страт [Sinevich et al., 2023].

– Было обнаружено влияние СПД на распространение трансionoсферных радиосигналов ГНСС: увеличение показателей фазовых и амплитудных мерцаний, а также потеря захвата сигнала.

– Выяснено, что страты поляризационного джета и неоднородности параметров плазмы внутри них могут вызывать множественные отражения радиосигнала, которые видны на ионограммах в виде F-рассеяния.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Galperin Y., Ponomarev V., Zosimova A. Plasma convection in the polar ionosphere // *Annales Geophysicae*. 1974. V. 30. P. 1–7.
- Sinevich A.A., Chernyshov A.A., Chuginin D.V. et al. Small-scale irregularities within polarization jet/SAID during geomagnetic activity // *Geophys. Res. Lett.* 2022. V. 49. e2021GL097107 <https://doi.org/10.1029/2021GL097107>
- Sinevich A.A., Chernyshov A.A., Chuginin D.V. et al. Stratified Subauroral Ion Drift (SSAID) // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2023. V. 128. e2022JA031109. <https://doi.org/10.1029/2022JA031109>
- Spiro R.W., Heelis R.A., Hanson W.B. Rapid subauroral ion drifts observed by Atmosphere Explorer C // *Geophys. Res. Lett.* 1979. V. 6(8). P. 657–660. <https://doi.org/10.1029/GL006i008p00657>