

ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЙ ДЖЕТ И НЕОДНОРОДНОСТИ В ВАРИАЦИЯХ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ВО ВРЕМЯ ВОЗМУЩЕНИЯ 20 АПРЕЛЯ 2020 ГОДА

И.И. Шагмуратов¹, Н.Ю. Тепеницына¹, И.И. Ефишов¹, Г.А. Якимова¹, М.В. Филатов²

¹Калининградский филиал ИЗМИРАН, г. Калининград, Россия

²Полярный геофизический институт, г. Апатиты, Россия

Аннотация. В работе представлено проявление поляризационного джета (ПД) в GPS TEC вариациях во время умеренной магнитной бури 20 апреля 2020г. ПД регистрировался по данным DMSP спутников. На картах TEC ПД идентифицировался как узкий по широте провал. При пересечении GPS спутников области ПД обнаружены изолированные всплески флуктуаций сигналов GPS. Это свидетельствует о формировании ионосферных неоднородностей в области поляризационного джета.

Введение

Поляризационный джет (ПД), или субавроральный ионный дрейф (SAID), известен как узкая по широте область быстрого дрейфа ионов на запад [Galperin *et al.*, 1974]. ПД всегда наблюдается экваториальнее границы авроральных высыпаний и тесно связаны с динамикой среднеширотного провала и смещается на более низкие широты с ростом магнитной активности (Kp). С этим явлением связано образование глубоких провалов плотности в области F [Spiro *et al.*, 1979]. На высотах области F широтная протяженность ПД составляет 1°–2°, а скорость дрейфа превышает 1 км/с. Статистика в цикле солнечной активности, сезонных и суточных вариаций по спутниковым данным DMSP (Defense Meteorological Satellite Program) за период 1987–2012 гг. представлена в работе [He *et al.*, 2014]. Статистические результаты показали, что ПД чаще всего располагается на широте около 60° MLAT, в диапазоне 56–65° MLAT, в большом интервале местного магнитного времени (MLT), по крайней мере с 16 до 24MLT. Ширина ПД увеличивается с понижением широты и имеет большую протяженность в максимуме солнечной активности. Поляризационный джет чаще регистрируется в равноденствия [He *et al.*, 2014]. Сезонный ход широты ПД имеет минимумы весной и осенью, а широтная протяженность ПД имеет минимумом летом. SAID демонстрируют четкую вариацию MLT по широте. Определяющим фактором формирования ПД являются геомагнитные возмущения. Известно, что частота проявления и широтно-временные характеристики ПД коррелируют с Kp, Dst, AE индексами [Zhang *et al.*, 2015].

Для исследования ПД и анализа его структуры использовался комплекс спутниковых и наземных наблюдений [Anderson *et al.*, 2001; Makarevich and Bristow, 2014; Stepanov *et al.*, 2017]. Недавние исследования ПД на основе спутниковых данных NorSat-1 позволили выявить тонкую структуру ПД [Синевиц, 2024; Sinevichet *et al.*, 2022]. В данном исследовании представлен анализ появления поляризованного джета и пространственно-временной структуре в наблюдениях GPS-TEC для геомагнитной бури 20 апреля 2020 г.

Геомагнитные условия

Событие 20 апреля характеризуется как умеренная по интенсивности магнитная буря, минимальное значение Dst составляло около -65 nT. в 13UT. Индекс авроральной активности SME 20 апреля превышал ~1200 nT в интервале 09–12UT (рис.1). Столь высокая авроральная активность является признаком вероятности появления поляризационного джета.

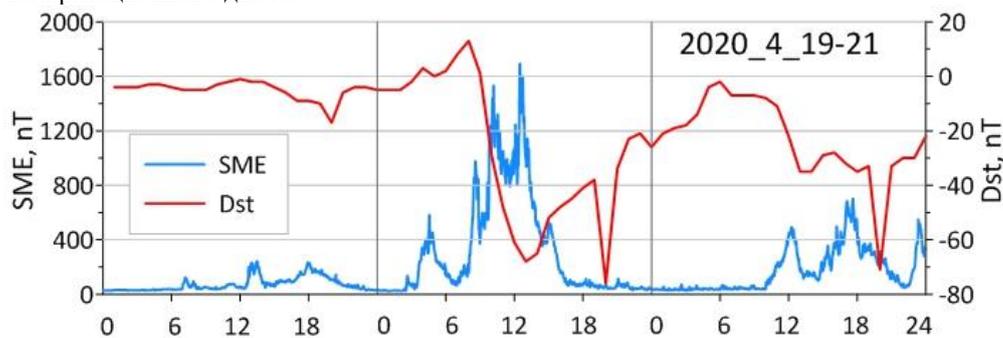


Рисунок 1. Вариации Dst и SME индексов 19–21 апреля 2020 г.

Результаты и обсуждение

Для анализа ПД привлекались измерения DMSP северного полушария для долгот, где обеспечивается высокое разрешение измерений ТЕС по широте. Карты ТЕС формировались для географических широт выше 30°N. Нами не использовались пролёты DMSP спутников на долготах восточной части России, учитывая низкое покрытие этого региона GPS/ГЛОНАСС приемниками. В пролетах DMSP спутников поляризационный джет идентифицировался по двум главным признакам: скорость горизонтального дрейфа ионов V_h выше 500-600 м/с и соответствующая этому показателю - минимальная величина электронной концентрации N_e .

Определяющим фактором формирования ПД являются геомагнитные возмущения, вероятность появления ПД высока в возмущенных условиях. Поляризационный джет всегда регистрируется на субавроральных широтах экваториальнее области высыпаний с высокой степенью корреляции между ПД и индексом авроральной активности АЕ. Согласно *Horvath and Lovell [2023]* проявление ПД чаще всего наблюдается в интервале 3-6MLT. Максимальная авроральная активность 20 апреля приходилась на интервал 07-14UT. В соответствии с этими признаками ПД был идентифицирован на долготах Канады ~80°W (Рис.2).

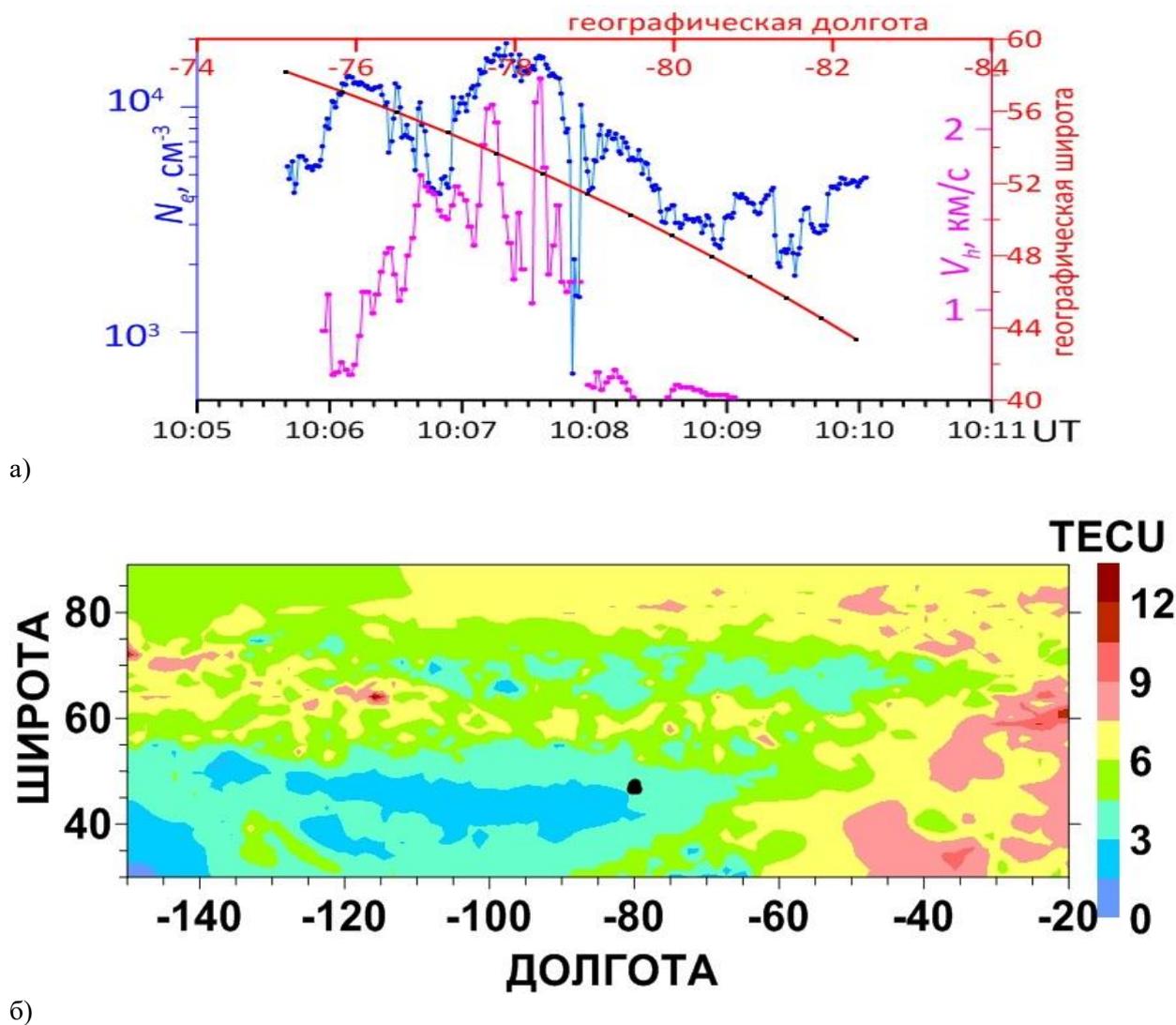


Рисунок 2. (а) Проявление ПД по измерениям DMSP спутника F16 20 апреля 2020 г. в 10 UT на долготах Канады. Горизонтальная скорость дрейфа (сиреневая кривая), плотность плазмы (синяя). Красная линия – траектория пролёта спутника (географическая долгота – географическая широта); (б) Карта ТЕС для 10 UT на соответствующих долготах (географические координаты). Положение ПД –чёрный кружок.

В вариациях горизонтальной скорости дрейфа ярко проявляются два пика (Рис.2а). Для первого пика скорость дрейфа достигали 1.75 км/с, для второго пика скорость достигали 2.14 км/с. Временное разделение между пиками составляла около 30с. Очень низкая электронная концентрация регистрировалась вблизи пиков, которая составляла не более $N_e \sim 7,0 \times 10^3 \text{ см}^{-3}$. Разница в широтном положении пиков составляла $\sim 1^\circ$. В целом характеристики (параметры) ПД укладываются в признаки ПД, представленные в работах [He et al., 2016; Aa et al., 2020]. Геомагнитная широта ПД приходится на широты $67-64^\circ$ MLAT на местное магнитное время около 5.1 MLT.

На карте ТЕС (Рис.2б) проявляется хорошо выраженный провал, узкий по широте и вытянутый по долготе. Провал регистрируется на субавроральных широтах экваториальнее области высыпаний. Подобная структура ТЕС провала наблюдалась во время магнитной бури 18 марта 2018г. [Shagimuratov et al., 2025]. На карте ТЕС показано положение ПД (чёрная точка), который идентифицировался в измерениях DMSP спутника около 10 UT. Пространственно-временное положение ТЕС провала хорошо соотносится с положением ПД. Можно полагать, что ТЕС провал является признаком проявления ПД в вариациях ТЕС. Величин ТЕС в провале не превышала 2-3 TECU. Во время сравнимой по интенсивности магнитной бури 18 марта 2018 года также регистрировался глубокий провал в ТЕС измерениях [Shagimuratov et al., 2025]. Величина ТЕС в провале не превышала 1-2 TECU. Это различие обусловлено тем, что во время бури 18 марта провал регистрировался в европейском секторе около 23 часов местного времени (LT). Для рассматриваемого события провал регистрировался в утренние часы около 05 LT. Пространственно-временное распределение ТЕС различно в этих геофизических условиях.

Ионосферные неоднородности, ассоциированные с ПД

Одним из известных средств детектирования и непрерывного мониторинга ионосферных неоднородностей является использование сигналов навигационных спутников. Стандартные наблюдения позволяют получать данные о ТЕС с 30-секундным интервалом.

Наиболее широко используемым индексом ТЕС флуктуаций являются параметр ROT (Rate OF TEC) и индекс интенсивности флуктуаций ROTI [Pi et al., 1997]. Индексы позволяют детектировать наличие ионосферных неоднородностей. Единица измерения ROT- TEC/мин: $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ электрон/м}^2$. Основные аспекты методики определения ROT/ROTI освещены в работе [Zakharenkova et al., 2018]. Индекс рассчитывался с 5-минутным интервалом для всех видимых станцией спутников с углами возвышения спутников выше 20° . Мы применили дополнительную обработку полученных данных с целью выявления и коррекции фазовых сдвигов (cycle slips, потеря фазы, “перескок” фазы), а также устранения возможных выпадающих значений. Измерения корректировались на скачки фазы (cycle slips) при их величине более 5 TEC на интервал 30 сек.

На рис.3 показан эффект проявления флуктуаций навигационных сигналов во время регистрации поляризационного джета по спутниковым измерениям. Мы отмечали, что по измерениям спутника DMSP ПД зарегистрирован в 10UT на магнитной широте около 65° MLAT, на географической долготе около 80° W в канадском секторе на широтах $55^\circ-53^\circ$ N. Ближайшей GPS станцией к положению ПД является SCH2 (54.6° N, 66.8° W).

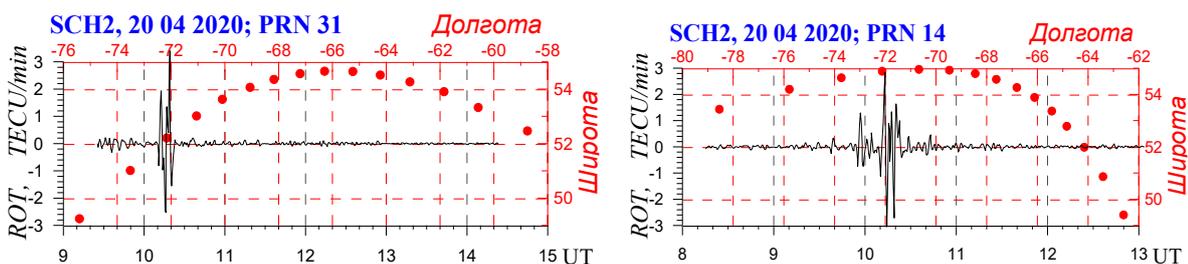


Рисунок 3. Вариации ROT вдоль пролётов спутников PRN14 и PRN31 по станции SCH2 20 апреля, красные кружки- траектория пролёта спутников (географические координаты).

Интенсификация ТЕС флуктуаций наблюдается на интервале 07-13UT в канадском секторе, когда регистрировался поляризационный джет в измерениях DMSP спутников. Усиление флуктуаций навигационных сигналов во время магнитной бури 18 марта 2018года которые были ассоциированы с поляризационным джетом представлено в работе [Kotova et al., 2025].

На вариациях ROT вдоль пролётов GPS спутников явно выделяются сильные по интенсивности кратковременные изолированные всплески. Для пролёта PRN31 положение всплеска приходится на географическую широту 52.5° N (61.1° MLAT), долготу около 72° W. Для пролёта PRN14 широта положения всплеска составляет 54.8° N (63.0° MLAT), 70° W. Как было указано выше, геомагнитная широта ПД приходится на широты $67-64^\circ$ MLAT на местное магнитное время около 5.1MLT. Широтное положение всплесков весьма

близко к широте ПД. Таким образом, пространственно-временное положение всплеска в ROT однозначно соотносится с положением ПД. Всплеск TEC флуктуаций свидетельствует о проявлении ионосферных неоднородностей, ассоциированных с поляризационным джетом.

Список литературы

- Аа Е., Erickson P.J., Zhang S.-R. et al. *A statistical study of the subauroral polarization stream over North American sector using the Millstone Hill incoherent scatter radar 1979–2019 measurements* // J. Geophys. Res. 2020. V. 125. e2020JA028584. DOI: 10.1029/2020JA028584
- Anderson P.C., Carpenter D.L., Tsuruda K. et al. *Multisatellite observations of rapid subauroral ion drifts (SAID)* // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. No A12. P. 29585–29599.
- Galperin Y.I., Ponomarev V.N., Zosimova A.G. *Plasma convection in the polar ionosphere* // Annals of Geophysics. 1974. V. 30. No 1. P. 1–7.
- He F., Zhang X.-X., Chen B. *Solar cycle, seasonal, and diurnal variations of subauroral ion drifts: statistical results* // J. Geophys. Res. 2014. V. 11. No 6. P. 5076–5086.
- He F., Zhang X.-X., Wang W., Chen B. *Double-peak subauroral ion drifts (DSAIDs)* // Geophys. Res. Lett. 2016. V. 43. P. 5554–5562. DOI: 10.1002/2016GL069133
- Horvath I. and Lovell B.C. *Structured subauroral polarization streams and related auroral undulations occurring on the storm day of 21 January 2005* // J. Geophys. Res. 2016. V. 121. P. 1680–1695. DOI: 10.1002/2015JA022057
- Kotova D.S., Sinevich A.A., Chernyshov A.A. et al. *Strong turbulent flow in the subauroral region in the Antarctic can deteriorate satellite-based navigation signals* // Sci. Rep. 2025. V. 15. Art. 3458.
- Makarevich R.A., Bristow W.A. *Fine structure of subauroral electric field and electron content* // J. Geophys. Res.: Space Physics. 2014. V. 119. No 5. P. 3789–3802.
- Pi X., Mannucci A.J., Lindqwister U.J., Ho C.M. *Monitoring of global ionospheric irregularities using the Worldwide GPS Network* // Geophys. Res. Lett. 1997. V. 24. P. 2283–2286.
- Spiro R.W., Heelis R.A., Hanson W.B. *Rapid subauroral ion drifts observed by Atmosphere Explorer C* // Geophys. Res. Letters. 1979. V. 6. No 8. P. 657–660.
- Синеви́ч А.А., Чернышов А.А., Чугунин Д.В., Милох В.Я., Могилевский М.М. *Поляризационный джет и плазменные неоднородности различного масштаба* // Известия РАН, серия физическая. 2024. Т. 88. № 3. С. 438–444.
- Sinevich A.A., Chernyshov A.A., Chugunin D.V. et al. *Small-scale irregularities within polarization Jet/SAID during geomagnetic activity* // Geophys. Res. Lett. 2022. V. 49. No 8. e2021GL097107.
- Stepanov A.E., Khalipov V.L., Golikov I.A., Bondar E.D. *Polyarizatsionnyi dzhets: uzkie i bystrye dreify subavroral'noi ionosfernoi plazmy [Polarizing jet: narrow and fast drifts of subauroral ionospheric plasma]* // Yakutsk: Izdatelskii dom SVFU Publ. 2017. 176 p.
- Shagimuratov I.I., Klimenko M.V., Yakimova G.A., Efishov I.I. *Signature of a polarization jet in TEC observations* // Atmosphere, ionosphere, safety. Kaliningrad. 2025. P. 211.
- Zakharenkova I.E., Cherniak I.V., Shagimuratov I.I., Klimenko M.V. *Features of high-latitude ionospheric irregularities development as revealed by ground-based GPS observations, satellite-borne GPS observations and satellite in situ measurements over the territory of Russia during the geomagnetic storm on march 17-18, 2015* // Geomag. and Aeronomy. 2018. V. 58. No 1. P. 70–82.
- Zhang X.-X., He F., Wang W., and Chen B. *Hemispheric asymmetry of subauroral ion drifts: Statistical results* // J. Geophys. Res.: Space Physics. 2015. V. 120. P. 4544–4554. DOI: 10.1002/2015JA021016