

СОВПАДЕНИЕ ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ ГРАНИЦЫ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ДЖЕТА И ГРАНИЦЫ ИНЖЕКЦИИ ЭНЕРГИЧНЫХ ИОНОВ ВО ВРЕМЯ СУББУРЬ

В.Л. Халипов¹, А.Е. Степанов², Г.А. Котова¹, Е.Д. Бондарь²

¹ИКИ РАН, Профсоюзная 84/32, Москва

²ИКФИА им. Ю.Г. Шафера СО РАН, ул. Ленина 31, Якутск

Аннотация. Сопоставление отдельных случаев наблюдения поляризационного джета на наземных станциях и измерений энергичных ионов на спутнике AMPTE/CSE свидетельствуют о том, что эти явления возникают одновременно и на одних и тех же L-оболочках. Наблюдения поляризационного джета на спутниках DMSF позволяют статистически выявить зависимость положения его экваториальной границы от величины AE – индекса. Показано также, что для изолированных магнитных возмущений положение внутренней границы инъекции энергичных ионов, измеренных на спутнике AMPTE/CSE, зависит от величины AE – индекса. Оказалось, что зависимости обеих границ от AE – индекса совпадают в широком диапазоне изменений AE. Это свидетельствует о том, что экваториальная граница полосы поляризационного джета и внутренняя граница инъекции энергичных ионов физически взаимосвязаны и во время суббурь формируются на одних и тех же L-оболочках.

Введение. Быстрые ионные дрейфы в западном направлении вблизи проекции плазмоспаузы на высотах области F впервые были зарегистрированы на советском спутнике «Космос-184» и получили название «поляризационный джет» (ПД) [Гальперин и др., 1973]. В дальнейшем это явление было обнаружено и исследовалось по наблюдениям с других спутников, измерениям наземных станций некогерентного рассеяния радиоволн, а также по измерениям ионосферных станций [Smiddy et al., 1977; Southwood and Wolf, 1978; Spiro et al., 1979; Galperin et al., 1986; Филиппов и др., 1987; 1989; Anderson et al., 1993, 2001; Foster et al., 1994; Халипов и др., 2001; Степанов и др., 2008]. Ширина полосы поляризационного джета на ионосферных высотах составляет 1-2° широты на субавроральных широтах, а скорость дрейфа от 0.3 до 2.5 и более км/с в западном направлении. ПД регистрируется в основном в вечерне-предполуночном секторе MLT. В последнее время появились работы по морфологии и динамике субавроральных поляризационных потоков, обозначаемых как SAPS (SubAuroral Polarization Stream) [Foster and Burke, 2002; Foster and Vo, 2002; Huang and Foster, 2007; Wang et al., 2008; Clausen et al., 2012]. SAPS – это западный поток плазмы в области экваториальной границы авроральных электронных высыпаний в вечерне-полуночном секторе во время усиления геомагнитных возмущений. Ширина полосы SAPS составляет ~ 5° и больше, не имеет резких экваториальных и полярных границ, а средние пики скоростей в полосе >900 м/с. В приведенных работах не делается большого различия между SAPS и поляризационным джетом, который намного уже по ширине и имеет резкую экваториальную границу в Ne. Считается, что в отсутствии широкой полосы западного дрейфа ПД есть частный случай SAPS.

Уже в первых работах для объяснения появления ПД рассматривались электрические поля, возникающие в магнитосфере при инъекции энергичных ионов плазменного слоя во время суббурь вблизи полуночного

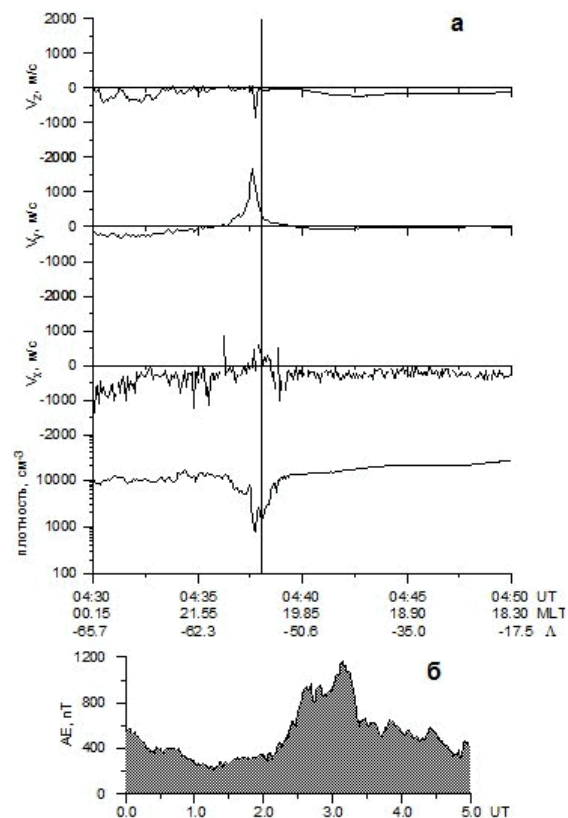


Рисунок 1. а - компоненты скорости дрейфа и плотность плазмы, измеренные на спутнике DMSF F13 25 апреля 1998 г. Вертикальной линией показана экваториальная граница полосы ПД. б – Изменение AE – индекса до и в период наблюдения ПД

меридиана [Smiddy et al., 1977; Southwood and Wolf, 1978]. Были предложены теоретические модели, как учитывающие, так и не требующие инъекции частиц [Lyatsky et al., 2006; Wolf et al., 2007; Stenpanov и др., 2011; Yu et al., 2015]. Однако прямые сопоставления отдельных случаев регистрации ПД по наземным данным и на спутниках серии DMSP с одновременными измерениями энергичных ионов на спутниках AMPTE CSE и ИНТЕРБОЛ 2 свидетельствуют о том, что эти явления физически взаимосвязаны [Khalipov et al., 2003; Mishin, 2013].

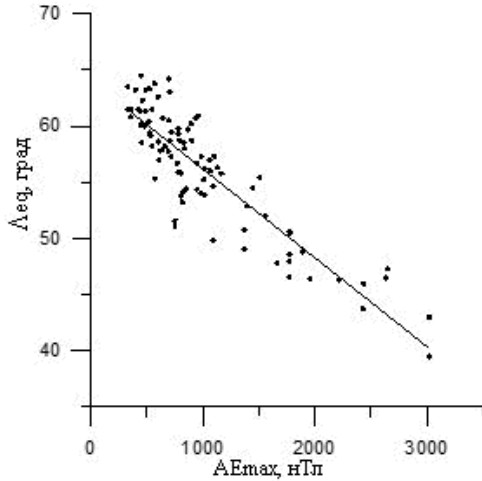


Рисунок 2. Зависимость положения экваториальной границы ПД от величины всплеска AE-индекса.

В настоящей работе на большом статистическом материале рассмотрена зависимость положения ПД, регистрируемого на спутниках DMSP F12, F13 и F14, от величины AE – индекса. По измерениям ионов с энергией ≤ 50 кэВ построена зависимость внутренней границы их инжекции также от величины AE – индекса. Полученные зависимости сопоставляются между собой.

Положение экваториальной границы поляризационного джета.

Для статистического анализа положения поляризационного джета при суббурях различной интенсивности выбирались наблюдения ПД по данным прибора SSIES [Rich and Hairston, 1994] спутников DMSP F12, F13 и F14 во время изолированных суббурь, когда можно отождествить пересечение спутником полосы ПД с конкретным всплеском AE – индекса. На рис. 1а показан пример наблюдения поляризационного

джета в позднем вечернем секторе на спутнике DMSP F13 25 апреля 1998 г. после суббури с максимальным $AE_{max} = 1170$ нТл, которое было зафиксировано в 03:09 UT (рис. 1б). ПД регистрируется как скачок направленного на запад компонента скорости V_y в 04:38 UT в южном полушарии через ~ 1.5 час после прохождения максимума суббуревой активности. Вертикальной линией на рис. 1а отмечена экваториальная граница полосы ПД по уровню $V_y = 400$ м/с. Инвариантная широта этой границы $\Lambda_{eq} = -55.8^\circ$. Максимальная наблюдавшаяся скорость западного дрейфа плазмы ~ 1.7 км/с. Нижняя панель на рис. 1а показывает вариации плотности плазмы вдоль орбиты спутника. Видно, что внутри полосы ПД плотность плазмы в ионосфере понижена на порядок величины.

По данным спутников DMSP F12, F13 и F14 было выбрано 93 события наблюдения ПД (включая SAPS), которые были сопоставлены с предваряющим всплеском AE различной интенсивности. На рис. 2 показана зависимость положения экваториальной границы ПД от величины всплеска AE_{max} . Эта зависимость хорошо описывается линейным выражением:

$$\Lambda_{eq} = -0.0079 * AE_{max} + 64.0^\circ \quad (1)$$

с коэффициентом детерминации $D = 0.79$. Полученное выражение можно использовать для оценки положения экваториальной границы ПД.

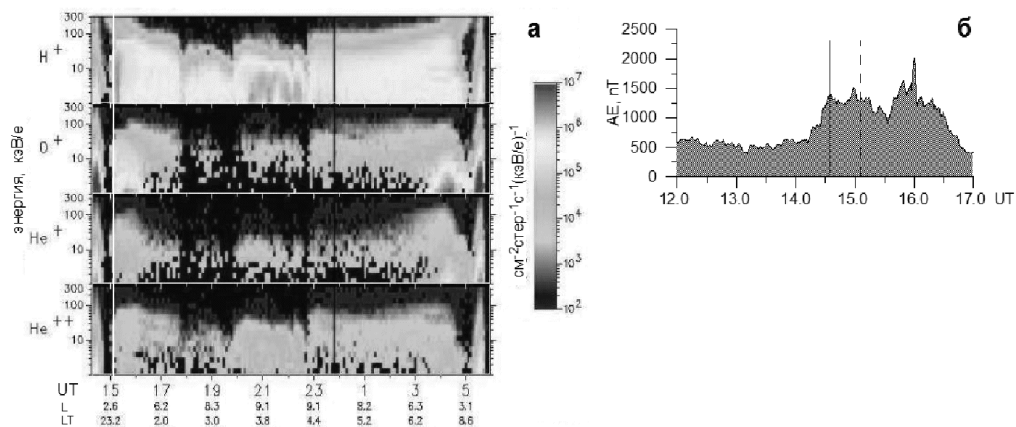


Рисунок 3. а – Последовательность энергетических спектров потоков ионов, измеренных на спутнике AMPTE/CSE вдоль орбиты 25 - 26 сентября 1987 г. Сплошной белой линией отмечено пересечение границы инжекции энергичных протонов. **б** – Изменения AE индекса 25 сентября 1987 г.

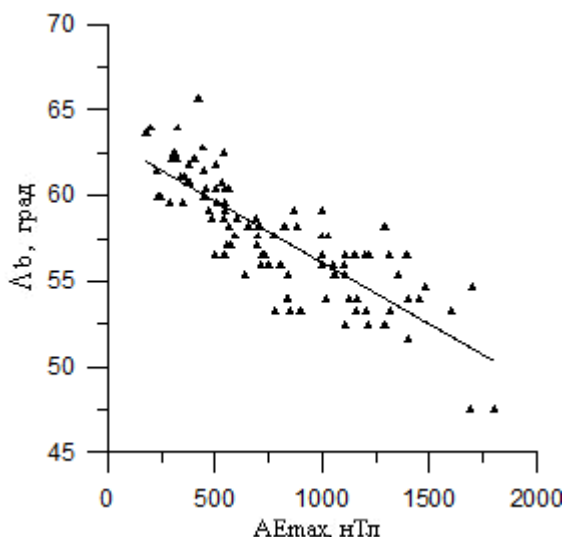


Рисунок 4. Зависимость положения границы инжекции энергичных ионов от величины всплеска АЕ-индекса.

По данным спутника AMPTE/CSE, полученных в 1985-1987 гг., было выбрано 99 событий наблюдения границы инжекции ионов с энергией до ~50 кэВ во внутренней магнитосфере после изолированных магнитных возмущений. Оказалось, что инвариантная широта Λ_b магнитной оболочки, где наблюдалась граница инжекции, зависит от величины АЕ – индекса, соответствующего начальному всплеску суббуревой активности (рис. 4). Эта зависимость хорошо аппроксимируется линейным соотношением:

$$\Lambda_b = -0.0072 * AE_{max} + 63.2^\circ \quad (2)$$

с коэффициентом детерминации $D = 0.67$.

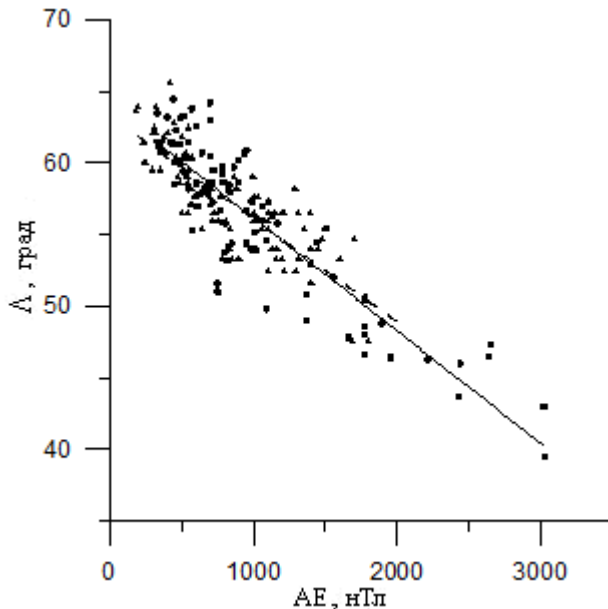


Рисунок 5. Зависимость экваториальной границы ПД (точки) и границы инжекции энергичных ионов во внутреннюю магнитосферу (треугольники) от начального всплеска АЕ суббуревой активности. Сплошная линия – аппроксимирующая зависимость (1), пунктирная линия – зависимость (2).

Положение границы инжекции энергичных ионов.

По данным измерений спутника AMPTE/CSE рассмотрены вариации границы инжекции энергичных (до ~50 кэВ) ионов во внутренней магнитосфере для суббуревых возмущений различной интенсивности. Вблизи области инжекции в секторе 22-01 MLT наблюдались ионы без дисперсии в широком диапазоне энергий, а в вечернем секторе – с дисперсией в форме “носовых структур”. На рис. 3а показаны спектрограммы энергия-время для различных ионов, измеренные 25-26 сентября на спутнике AMPTE/CSE спектрометром СНЕМ [Gloeckler et al., 1985]. Граница инжекции ионов (белая линия слева) наблюдалась в ~15.05 UT в околополуночном секторе (~23.5 LT) при $L = 2.9$. Соответствующий максимум АЕ наблюдался в 14:35 UT (отмечен сплошной линией на рис. 3б) всего за 30 минут до пересечения спутником AMPTE/CSE границы инжекции ионов (пунктирная линия на рис. 3б). Эти измерения свидетельствуют о том, что уже через ~30 минут после начала суббури с $AE > 1000$ нТл, энергичные ионы в околополуночном секторе достигают оболочки $L \leq 3.0$ [Khalipov et al., 2003].

Сопоставление экваториальной границы ПД и границы инжекции энергичных ионов.

Выводы. На рис. 5 сравниваются зависимости, представленные на рис. 2 и 4. Видно, что поля экспериментальных точек практически совпадают и аппроксимирующие прямые (1) и (2) очень близки друг к другу. Это означает, что экваториальная граница поляризованного джета, развивающегося в ионосфере во время суббури, совпадает с границей инжекции ионов с энергией до ~50 кэВ во внутреннюю магнитосферу. Совпадение этих границ в широком диапазоне АЕ безусловно свидетельствует о физической взаимосвязи развития ПД в ионосфере и инжекции энергичных ионов во внутреннюю магнитосферу во время суббури. Поэтому механизм, который описывает возникновение и развитие ПД, должен непременно учитывать инжекции энергичных частиц. Следует отметить, что эмпирические зависимости (1) и (2) могут быть использованы для оценки положения этой общей границы в других исследованиях.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 15-45-05090, № 15-45-05066) и программы РАН П9. Авторы выражают

благодарность Центру космических наук Университета Техаса в Далласе (<http://cindispace.utdallas.edu/DMSP/>) за предоставление данных спутников DMSP, Г. Глоеклеру (G. Gloeckler) и Д. Хамильтону (D. Hamilton) за предоставление данных эксперимента СЕМ спутника AMPTE/CCE.

Литература

- Гальперин Ю.И., Пономарев В.Н., Зосимова А.Г. Прямые измерения скорости дрейфа ионов в верхней ионосфере во время магнитной бури // *Космич. исслед.* Т.1. № 2. С. 273–296. 1973.
- Степанов А.Е., Халипов В.Л., Бондарь Е.Д. Сопоставление характеристик поляризационного джета на разнесенных станциях Якутск и Подкаменная Тунгуска // *Космич. исслед.* Т. 46. №2. С. 116-121. 2008.
- Степанов А.Е., Голиков И.А., Попов В.И., Бондарь Е.Д., Халипов В.Л. Структурные особенности субавроральной ионосферы при возникновении поляризационного джета // *Геомагнетизм и аэрономия.* Т.51, №5. С.643-649. 2011.
- Филиппов В.М., Решетников Д.Д., Соловьев В.С. Степанов А.Е., Андреев Р.П. Наблюдения методом Д1 полосы субаврорального ионного дрейфа // *Комплексные исследования полярной ионосферы, Апатиты, КФ АН СССР.* С.45-48. 1987.
- Филиппов В.М., Решетников Д.Д., Халипов В.Л., Степанов А.Е., Соловьев В.С., Мулярчик Т.М. Комплексные измерения узких провалов ионизации в области F наземными и спутниковыми методами // *Космич. исслед.* Т.27. С.568-584. 1989.
- Халипов В.Л., Гальперин Ю.И., Степанов А.Е., Шестакова Л.В. Формирование поляризационного джета в ходе взрывной фазы суббури: результаты наземных измерений // *Космич. исслед.* Т.39. Вып.3. С.244-253. 2001.
- 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. P.6069-6078. 1993.
- Anderson P. C., Carpenter D.L., Tsuruda K., Mukai T., Rich F.J. Multisatellite observations of rapid subauroral ion drifts (SAID) // *J. Geophys. Res.* V.106, P.29585–29599. 2001.
- Clausen L. B. N., Baker J. B. H., Ruohoniemi J.M., Greenwald R. A., Thomas E. G., Shepherd S. G., Talaat E. R., Bristow W. A., Zheng Y., Coster A. J., and Sazykin S. Large-scale observations of a subauroral polarization stream by midlatitude SuperDARN radars: Instantaneous longitudinal velocity variations // *J. Geophys. Res.* V.117. A05306. doi:10.1029/2011JA017232. 2012.
- Foster J.C., Buonsanto M.J., Mendillo M., Nottingham D., Rich F.J., Denig W. Coordinated stable auroral red arc observations: Relationship to plasma convection // *J. Geophys. Res.* V.99. P.11429-11439. 1994.
- Foster J., Burke W. SAPS: A new categorization for subauroral electric fields // *EOS Trans. AGU.* V.83. P.293–294. 2002.
- Foster J.C., Vo H.B. Average characteristics and activity dependence of the subauroral polarization stream // *J. Geophys. Res.* V.107. № A12. 1475. doi:10.1029/2002JA009409. 2002.
- Galperin Yu.I., Khalipov V.L., Filippov V.M. Signature of rapid subauroral ion drifts in the high-latitude ionosphere structure // *Ann. Geophysicae.* V.4. №A2. P.145-154. 1986.
- Gloeckler G., Ipavich F.M., Studemann W., Wilken B., Hamilton D.C., Kremser G., Hovestadt D., Gliem F., Lundgren R.A., Rieck W., Tums E.O., Cain J.C., Masung L.S., Weiss W., Winterhof P. The charge-energy-mass spectrometer for 0.3-300 keV/e ions on the Ampte CCE // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* V.GE-23. №3. P.234-240. 1985.
- Huang C.-S., Foster J.C. Correlation of the subauroral polarization streams (SAPS) with the Dst-index during severe magnetic storms // *J. Geophys. Res.* V.112. A11302. doi: 10.1029/2007JA012584. 2007.
- Khalipov V.L., Galperin Yu.I., Stepanov A.E., Bondar' E.D. Formation of polarization jet during injection of ions into the inner magnetosphere // *Adv. Space Res.* V.31. P.1303-1308. 2003.
- Lyatsky W., Tan Arjun, and Khazanov G. V. A simple analytical model for subauroral polarization stream (SAPS) // *Geophys. Res. Lett.* V.33. L19101. doi:10.1029/2006GL025949. 2006.
- Mishin, E. V. Interaction of substorm injections with the subauroral geospace: 1. Multispacecraft observations of SAID // *J. Geophys. Res.* V.118. P.5782–5796. doi:10.1002/jgra.50548. 2013.
- Rich, F., and Hairston M. Large-scale convection patterns observed by DMSP // *J. Geophys. Res.* V. 99, P. 3827-3844. 1994
- 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 plasmopause // *Geophys. Res. Lett.* V.4. P.543-546. 1977.
- Southwood D.J., Wolf R.A. An assessment of the role of precipitation in magnetospheric convection. // *J. Geophys. Res.* V.83. P. 5227-5232. 1978.
- Wang H., Ridley A.J., Luhr H., Liemohn M.W., Shu Y. Ma. Statistical study of the subauroral polarization stream: Its dependence on the cross-polar cap potential and subauroral conductance // *J. Geophys. Res.* V.113. A12311. doi:10.1029/2008JA013529. 2008.
- Wolf R.A., Spiro R.W., Sazykin S., Toffoletto F.R. How the Earth's inner magnetosphere works: An evolving picture // *J. Atm. Solar-Terr. Phys.* V.69. P.288–302. 2007.
- Yu Y., Jordanova V., Zou S., Heelis R., Ruohoniemi M., Wygant J. Modeling subauroral polarization streams during the 17 March 2013 storm // *J. Geophys. Res.* V.120. P. 1738–1750. 2015.