

DOI: 10.51981/2588-0039.2023.46.011

ИССЛЕДОВАНИЯ СУБАВРОРАЛЬНОЙ ИОНОСФЕРЫ И МАГНИТОСФЕРЫ С ПОМОЩЬЮ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ СПУТНИКОВ И МЕТОДОМ КОРОТКОВОЛНОВОЙ РАДИОЛОКАЦИИ

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

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия; e-mail: khalipov@iki.rssi.ru

²Институт космических исследований и астрономии СО РАН им. Ю.Г. Шафера, Якутск, Россия

Аннотация

В работе анализируются результаты многолетних комплексных экспериментов, выполненных на сети станций Якутского геофизического полигона и с помощью ионосферных и высоко-апогейных спутников. Наземные оптические измерения выполнялись в обсерватории Маймага ($L = 3.2$). Ионосферные наблюдения проводились в Якутске ($L = 3.0$), Жиганске ($L = 4.0$), Тикси ($L = 5.6$), Подкаменной Тунгуске ($L = 3.0$) и Магадане ($L = 2.9$) методами вертикального и наклонного зондирования с помощью высокопотенциальных двойных горизонтальных ромбических антенн. Настоящая работа суммирует физические свойства поляризационного джета с целью проведения геофизической верификации возможных механизмов его формирования. По ионограммам ионосферных станций при сопоставлении их со спутниковыми измерениями быстрых струйных течений плазмы выявлена сигнатура поляризационного джета. Это позволило использовать 15-минутные ионозондовые измерения обширной сети станций для исследования локального и быстро протекающего процесса развития поляризационного джета. Это также дало возможность провести сопоставление с измерениями энергичных ионов на спутнике AMPTE/CSE и установить, что поляризационный джет развивается на внутренней границе кольцевого тока. По многолетним измерениям ионозондов было установлено, что поляризационный джет возникает в около-полуночном секторе на взрывной фазе суббури в области разрыва Харанга.

Введение

С начала 70-х годов метод регистрации наклонно-отраженных сигналов от ионосферы в коротковолновом диапазоне стал развиваться в лаборатории ионосферных исследований ИКФИА. Сначала в Якутске, затем на станциях Жиганск и бухта Тикси. В это же время осуществлялся Советско-Французский проект АРКАД с использованием прямых (in-situ) измерений тепловой и энергичной плазмы на спутниках Ореол-1-3, а также измерений энергичных ионов кольцевого тока на аппарате AMPTE/CSE и измерения серии спутников DMSP. Для понимания механизма формирования поляризационного джета (ПД) необходимо установить, на какой фазе суббурного возмущения он развивается. Измерения на спутниках не могут дать точную привязку по времени этого локального быстроразвивающегося процесса. По измерениям двух компланарных спутников DE-1,-2 Р.К. Anderson с соавторами (1993) соотнесли появление ПД с фазой развития суббури. Частота зондирования зонда АИС составляет 15 минут, в них может попадать и фаза взрыва суббури и фаза развития. Развертка частоты ионозонда - 40 секунд. За ряд лет мы выбрали моменты развития ПД по данным станции Якутск, при которых момент начала суббури по АЕ – индексу совпадает с началом развертки частоты ионозонда. Для таких событий развитие ПД в около-полуночном секторе происходит на взрывной фазе суббури.

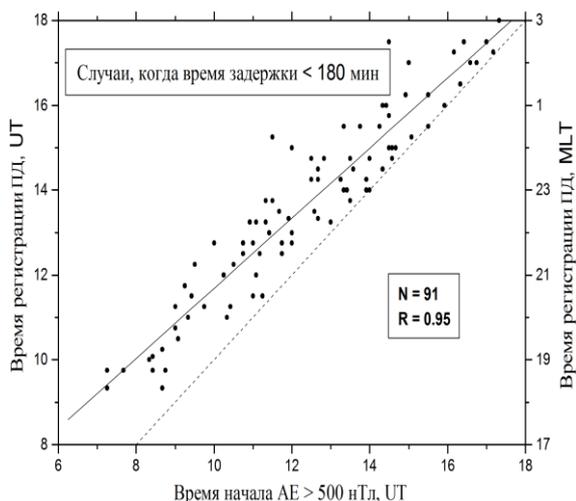


Рисунок 1. Зависимость времени появления поляризационного джета на ионосферной ст. Якутск от времени начала суббури со значениями АЕ-индекса превышающими 500 нТ. Штриховая линия обозначает отсутствие задержки между событиями.

Описание результатов экспериментальных исследований

За ряд лет мы выбрали моменты развития ПД по данным ионосферной станции Якутск – ось ординат на Рис. 1 и

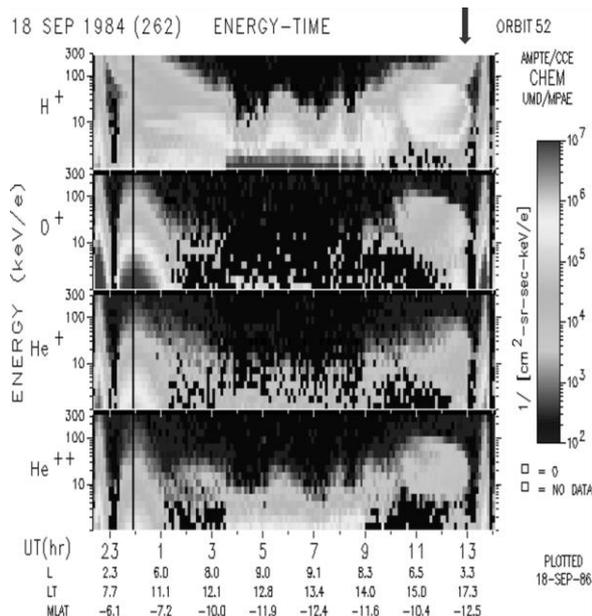


Рисунок 2. Измерения энергичных ионов на спутнике AMPTE/CCE 19 сентября 1984 года вблизи меридиана ионосферной ст. Подкаменная Тунгуска, где регистрировался ПД. Граница инжекции ионов (nose-event) (стрелка) наблюдалась в 13 UT в вечернем секторе 17.3 LT на L = 3.1 через три часа после начала магнитной бури по АЕ-индексу.

кольцевого тока всех энергий. Подробно рассмотрено более 15 случаев развития ПД и одновременных измерений энергичных частиц кольцевого тока во время суббурь и больших магнитных бурь, и во всех случаях наблюдается совпадение границ двух явлений.

сравнили с моментами начала суббури по АЕ индексу - ось абсцисс. Штриховая линия на Рис. 1 обозначает отсутствие задержки между этими событиями. Можно видеть, что в около-полуночном секторе наблюдается ряд событий развития ПД с нулевой задержкой относительно начала развития суббури. Таким образом, в пределах нескольких минут ПД развивается на взрывной фазе суббури. Подробный анализ магнитограмм таких событий показал, что они регистрируются при прохождении станцией биполярной вариации горизонтальной компоненты магнитного поля – разрыва Харанга (*Khalipov et al., 2001*).

На спутнике AMPTE/CCE с помощью энерго-массового анализатора ионов проведены наблюдения ионов кольцевого тока в диапазоне энергий 1 – 300 кэВ (*Krimigis et al., 1985*). Спутник активно работал с сентября 1984 г. по ноябрь 1988 г. За этот период выполнены сопоставления внутренней границы кольцевого тока и положения ПД по сети ионосферных станций. На Рис. 2 приведен пример измерения энергичных ионов - носовых явлений (nose-events) - вблизи станции Подкаменная Тунгуска во время длительной магнитной бури и формирования ПД (*Khalipov et al., 2003*). Внутренняя граница кольцевого тока по данным спутника AMPTE/CCE расположена на L = 3.1 и близко совпадает с L-оболочкой ст. Подкаменная Тунгуска, где регистрируется ПД (*Khalipov et al., 2003*). При измерениях частиц кольцевого тока вблизи области инжекции в около-полуночном секторе MLT наблюдается общая резкая граница для частиц

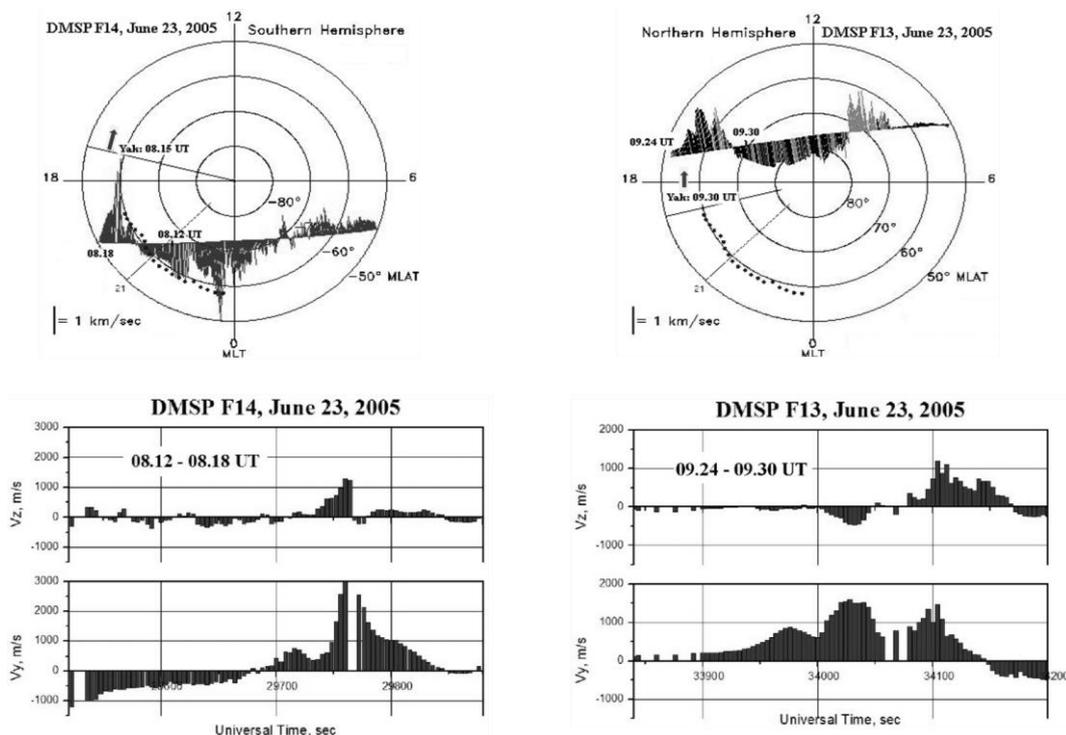


Рисунок 3. Одновременные измерения дрейфа плазмы на спутниках DMSP при пролетах в южном и северном полушариях и дигизондом DPS-4 на станции Якутск (отмечено стрелками на полярных диаграммах) во время развития ПД. Восходящие потоки над структурой ПД превышают 1 км/сек.

По Допплеровским измерениям с помощью ионозонда DPS-4 обнаружено, что над полосой ПД в слое F во время суббури наблюдаются высокие скорости (150 – 180 м/с) продольного – вдоль магнитного поля - дрейфа плазмы. По измерениям дрейфметра на спутниках DMSP на высоте ~ 850 км наблюдались высокие скорости вертикального продольного дрейфа – 1.0 – 1.2 км/с - Рис. 3.

Эти измерения ПД выполнены в условиях освещенной летней ионосферы. Процессы выноса ионизации столь интенсивны, что формируется глубокий провал в электронной концентрации и его резкая полярная кромка, показанная точками на полярных диаграммах. Измерения дрейфа плазмы дигизондом DPS-4 хорошо согласуются со спутниковыми измерениями дрейфа.

На Рис. 4 показаны измерения с помощью интерферометра Фабри-Перо температуры нейтральной атмосферы на станции Маймага 2 декабря 1989 г. в полосе ПД (Alexeyev et al., 1991; Khalipov et al., 2018) Эти измерения показывают, что в структурах, где развивается ПД с внедренной в него красной дугой, температура нейтральной атмосферы повышается до 1200 – 1450 К относительно уровня 1000 К, который наблюдается по невозмущенным дням месяца. Поскольку плотность нейтральной атмосферы на высотах F- области ~ 10⁸ см⁻³ такое повышение температуры свидетельствует о диссипации энергии в десятки эрг·см⁻³·с⁻¹. Этот приток энергии связан с фрикционным разогревом среды при движении ионов со скоростью 1 – 3 км/с под воздействием электрического поля большой величины.

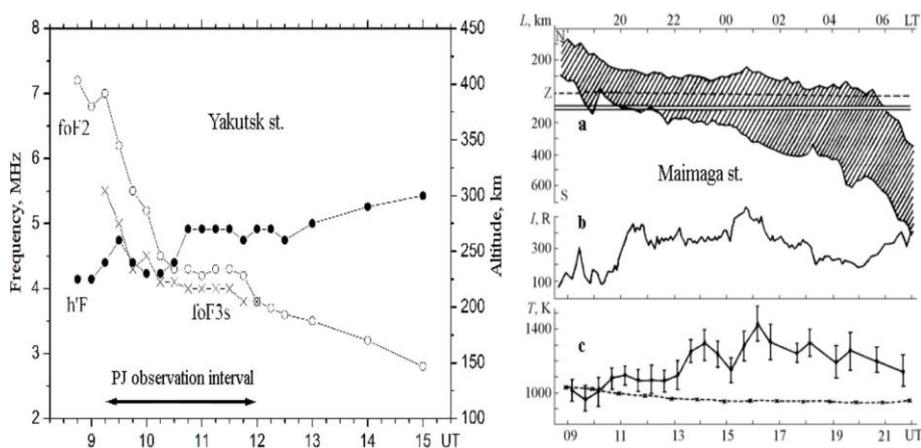


Рисунок 4. Оптические и ионосферные измерения 2 декабря 1989 г. Слева: вариации параметров ионосферы при развитии ПД и красной дуги. Светлые кружки показывают ход критических частот (foF2), черные кружки - минимальную высоту слоя F2, крестики - частоты слоя F3s, характерного для ПД. Справа: а) положение красной дуги по измерениям сканирующего фотометра, б) интенсивность линии 630.0 нм в дуге, с) измерения температуры нейтральной атмосферы в F-области. Пунктирная линия с крестиками - среднemesячный ход температуры нейтральной атмосферы в невозмущенные дни.

Обсуждение результатов

Если плазма с энергией в десятки кэВ попадает в сильное магнитное поле, то на ее границе возникает поляризационное электрическое поле большой величины. Энергичные ионы на границе совершают ларморовское вращение и проникают на 30 - 50 км от резкой границы плазмы. Электроны замагничены (у них меньше масса и ларморовский радиус) и смещаются незначительно. Это механизм был рассмотрен G. Haerendel (1970). J. De Keyser с соавторами (1998, 1999) выполнил необходимые расчеты для подтверждения его эффективности в создании электрических полей ПД. Возникли как возражения, состоящие в том, что эти поля будут нейтрализованы электронами фоновой плазмы, так и экспериментальные свидетельства в пользу того, что поля поляризации столь высоки и могут повышать энергию окружающей плазмы до нескольких кэВ и приводить к расширению структуры до SAPS. W.J. Burke с соавторами (1998) по мульти-спутниковым измерениям на космических аппаратах DMSP и CRESS сообщил, что результаты наблюдения ПД находят свое объяснение в случае действия генератора напряжения, расположенного в приэкваториальной области магнитосферы. Рассмотренный нами важный экспериментальный результат о возникновении ПД на взрывной фазе суббури обосновывает механизм генерации ПД как работу генератора напряжения в приэкваториальной области. Только в этом случае возможно столь быстрое возникновение электрических полей. Причем ПД развивается внутри плазмосферы, как это показано по многочисленным синхронным измерениям на спутниках DE-1,-2 (Horwitz et al., 1986).

Есть и другие точки зрения, где определяющим является генератор тока (Anderson et al., 1993; Anderson et al., 2001; Karlsson et al., 1998) или модель токового контура (Mishin, 2013; Mishin et al., 2017).

За период активной работы спутника AMPTE/CCE (сентябрь 1984 г. – ноябрь 1988 г.) было много случаев синхронных спутниковых и наземных измерений. Все они показали, что поляризационный джет развивается на внутренней границе кольцевого тока.

Высокие скорости вертикального дрейфа плазмы в полосе поляризационного дрейфа (Рис. 3) позволяют считать этот процесс важным фактором в формировании резкого провала электронной плотности в F-области ионосферы.

Насколько нам известно, интерферометрические измерения температуры нейтральной атмосферы (T_n) в ПД являются уникальными (Рис. 4). Они свидетельствуют об огромной диссипации энергии, вызывающей повышение T_n на 200-400 градусов. Всего было проанализировано 5 таких случаев и все они показали рост T_n на несколько сот градусов в полосе поляризационного джета.

Выводы

- По наземным ионозондовым измерениям на станции Якутск установлено, что ПД в около-полуночном секторе возникает в области разрыва Харанга на взрывной фазе суббури. Это свидетельствует в пользу действия генератора напряжения в приэкваториальной области, который порождает электрические поля в полосе ПД.

- По сопоставлениям измерений ионов кольцевого тока на спутнике АМРТЕ/ССЕ и синхронной регистрации ПД на сети ионосферных станций установлено, что ПД развивается на внутренней границе кольцевого тока.

- По наблюдениям на спутниках DMSP и ионозонда DPS-4 выявлено, что над полосой поляризационного джета формируется восходящий поток ионов со скоростью 1 – 1.5 км/с.

- По измерениям интерферометром Фабри-Перо температура нейтральной атмосферы в области ПД и внедренной в него субавроральной красной дуги повышена до 1200-1400 К относительно среднего уровня 1000 К, определенного по невозмущенным дням месяца.

Список литературы

Alexeyev, V.N., Khalipov, V.L., Ievenko, I.B., Ignatiev, V.M., Optical and ionospheric observation in the region of subauroral red arcs, In: Research on Geomagnetism, Aeronomy and Solar Physics, vol.93, Nauka Moscow, 143-152, 1991 (in Russian).

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., vol.98, 6069, 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., vol.106, 29585–29599, 2001.

Burke, W.J., Maynard, N.C., Hagan, M.P., Wolf, R.A., Wilson, G.R., Gentile, L.C., Gussenhoven, M.S., Huang C.Y., Garnet, T.W., Rich, F.J., Electrodynamics of the inner magnetosphere in dusk sector by CRESS and DMSP during magnetic storm of June 4-6, 1991, J. Geophys. Res., vol.103, 29399-29418, 1998.

De Keyser, J., Roth, M., Lemaire, J., The magnetospheric driver of subauroral ion drifts, Geophys. Res. Lett., vol.25, 1625-1628, 1998.

De Keyser, J., Formation and evolution of subauroral ion drift in the course of a substorm, J. Geophys. Res., vol.104, 12339, 1999.

Haerendel, G., Particles and Fields in the Magnetosphere, edited by B.M. McCormac, pp. 416-430, D. Reidel, Dordrecht, Netherlands, 1970.

Horwitz, J.L., Brace, L.H., Comfort, R.H., Chappel, C.R., Dual-Spacecraft Measurements of Plasmasphere-Ionosphere Coupling, J. Geophys. Res., vol.91, A10, 11203-11216, 1986.

Karlsson, T., Marklund, G.T., Blomberg, L.G., Malkki, A., Subauroral electric fields observed by the Freja satellite: A statistical study, J. Geophys. Res., vol.103, 4327, 1998.

Khalipov, V.L., Galperin, Yu.I., Stepanov, A.E., Shestakova, L.V., Formation of a polarization jet during the expansion phase of a substorm: results of ground-based measurements, Kosmicheskie Issledovaniya, vol.39, 226, 2001.

Khalipov, V.L., Galperin, Yu.I., Stepanov, A.E., Bondar, E.D., Formation of polarization jet during injection of ions into inner magnetosphere, Adv. Space Res., vol.31(5), 1303-1308, 2003.

Khalipov, V.L., Stepanov, A.E., Ievenko, I.B., Kotova, G.A., Panchenko, V.A., Formation of red arc in the polarization jet band, JASTP, vol.179, 494-503, 2018.

Krimigis, S.M., Gloeckler, G., McEntire, R.W., Potemra, T.A., Scarf, F.L., Shelley, E.G., Magnetic storm of September 4, 1984: A synthesis of ring current spectra and energy densities measured with AMPTE/CCE, Geophys. Res. Lett., vol.12(5), 329-332, 1985. doi: 10.1029/GL012i005p00329

Mishin, E., Interaction of substorm injections with the subauroral geospace: 1. Multispacecraft observations of SAID, J. Geophys. Res. Space Physics, vol.118, 5782–5796, 2013. doi:10.1002/jgra.50548

Mishin, E., Nishimura, Y., Foster, J., SAPS/SAID revisited: A causal relation to the substorm current wedge, J. Geophys. Res., vol.122, 8516–8535, 2017. doi:10.1002/2017JA024263