

DOI: 10.37614/2588-0039.2020.43.032

СУБАВРОРАЛЬНЫЕ ПОТОКИ ИОНОВ ИЗ ИОНОСФЕРЫ В ОБЛАСТИ РАЗВИТИЯ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ДЖЕТА

А.Е. Степанов¹, В.Л. Халипов², А.Ю. Гололобов³, И.А. Голиков¹, С.Е. Кобякова¹, Е.Д. Бондарь¹

¹Институт космофизических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
Якутский научный центр СО РАН, г. Якутск, Россия

²Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия

³Северо-восточный федеральный университет, г. Якутск, Россия

E-mails: a_e_stepanov@ikfia.ysn.ru; khalipov@iki.rssi.ru; golart87@gmail.com;
iagolikov@ikfia.ysn.ru; s.e.kobyakova@ikfia.ysn.ru; scisecr@ikfia.ysn.ru

Аннотация. Изучены и классифицированы быстропротекающие динамические процессы, возникающие в системе нейтральной атмосферы и ее ионизованной компоненты в верхней области F2 при воздействии на среду мощного электрического поля с амплитудой 50–100 мВ/м, иногда до 150 мВ/м. Сделан статистический анализ развития восходящих потоков плазмы из ионосферы в плазмосферу для различных геофизических условий. По данным доплеровских измерений на субавроральном ионосферном станциях Якутск впервые обнаружены новые, ранее неизвестные, динамические явления во время развития поляризационного джета. Проведенное исследование горизонтальных и вертикальных скоростей дрейфов ионосферы выявило, что в периоды наблюдения поляризационного джета пик вертикальной компоненты скорости не всегда совпадает с пиком горизонтальной составляющей. Скорости горизонтального дрейфа плазмы составляют, в среднем, ~300–600 м/с (есть события со скоростями 900–1000 м/с). Скорости вертикальной составляющей дрейфа, также в среднем, составляют 30–50 м/с (есть события со скоростями 100–150 м/с). По результатам анализа наземных ионосферных данных установлено, что все события с развитием поляризационного джета над Якутском подразделены равномерно на 4 группы, где первая группа – это когда значения вертикальных скоростей в полосе поляризационного джета достигали максимума одновременно с горизонтальными скоростями. В двух других группах времена пиков вертикальных скоростей сдвинуты в обе стороны от реперного времени на ± 1 ч, а в последнем случае вертикальные скорости имеют равнозначные пики по обе стороны от пиковых значений горизонтальных скоростей.

Введение. Поляризационный джет (ПД) – узкая полоса быстрого западного дрейфа плазмы вблизи проекции плазмопаузы на высотах области F ионосферы – впервые был зарегистрирован по данным спутника Космос-184 [Гальперин и др., 1973]. В настоящее время при описании явления ПД употребляется равноправно также термин SAPS – субавроальный поляризационный поток (SubAuroral Polarization Stream) [Foster and Burke, 2002]. Под этим термином авторы объединили два вида наблюдений субавроальных электрических полей: узкие полосы (1–2 град) ионного дрейфа (ПД) и широкие (до 10 град) области ионосферной конвекции к западу с большими скоростями, описанные в работе [Yeh et al., 1991]. Цифровой ионозонд DPS-4, установленный в Якутске, благодаря доплеровской выборке и измерениям углов прихода радиоволн дает возможность определить три проекции скорости для неоднородностей: V_z , V_N и V_E , что позволяет подсчитать средние скорости за сеанс зондирования, а также дисперсии скоростей [The digisonde..., 2007].

Целью данной работы является исследование скоростей дрейфов ионосферной плазмы и вариаций параметров слоя F2 во время развития полосы поляризационного джета в зените ст. Якутск.

Анализ данных и обсуждение результатов. В работе анализируются данные вертикального радиозондирования и доплеровские измерения на ст. Якутск за 2006 и 2012–2016 гг. Выборка дней для просмотра, обработки и анализа ионосферных данных производилась по планетарному AE-индексу. В ходе наземных измерений было установлено, что на широтах ст. Якутск проявления поляризационного джета в большинстве случаев развиваются после активизаций геомагнитного возмущения с пороговой величиной ≥ 500 нТл [Халипов и др., 2001]. Проявление поляризационного джета на ионограммах субавроальных станций подробно описано в работах [Galperin et al., 1986; Степанов и др., 2017] и кратко сводится к следующему: на ионограммах вертикального зондирования при развитии поляризационного джета регистрируются дополнительные следы отражений, меньшие по частоте и расположенные на большей дальности, чем регулярные фоновые следы. После появления таких отражений критические частоты

фонового слоя $F2$ могут резко уменьшаться в течение 15 – 30 мин на 2–4 МГц и более, т.е. происходит «срыв» частоты, который четко прорисовывается на суточных f -графиках ионосферных данных.

На рисунке 1 приведен пример измерений скоростей дрейфа ионосферной плазмы и вариаций параметров слоя $F2$ над ст. Якутск за 4 сентября 2016 г. На левой стороне рисунка показаны вариации вертикальной (V_z) и горизонтальной (V_h) скоростей, а также направление дрейфа ионосферной плазмы (Azimuth), где 270° – западное направление. На правой стороне приведен фрагмент суточных вариаций критической частоты (светлые кружочки) и минимальной высоты отражений от $F2$ -слоя ионосферы (черные квадратик). Здесь же жирной черной линией показан прогнозный ход критических частот по модели IRI. Видно, что в период развития поляризационного джета над станцией наблюдаются повышенные значения скоростей дрейфа ионосферной плазмы в западном направлении, рост вертикальной составляющей дрейфа плазмы, а также существенные вариации ионосферных параметров – «срыв» частоты и рост минимальной высоты отражений.

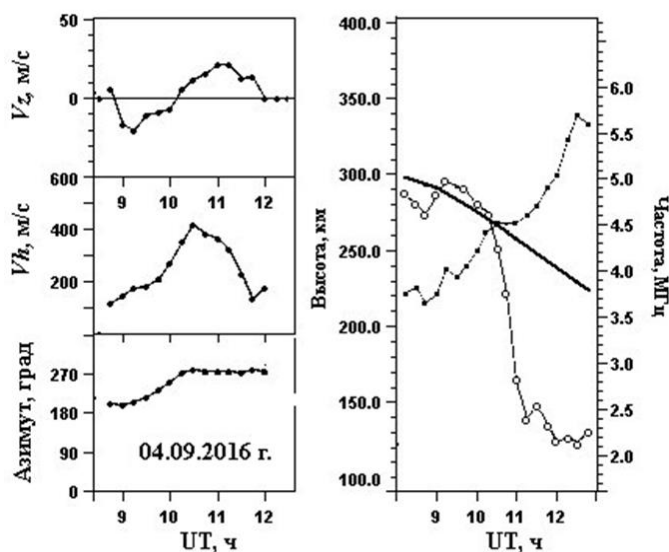


Рисунок 1. Вариации скоростей дрейфа ионосферной плазмы (слева) и ионосферных параметров (справа) над Якутском 4 сентября 2016 г.

Всего в ходе анализа ионосферных материалов было обнаружено и рассмотрено 110 событий поляризационного джета. Выявлено, что в периоды наблюдения поляризационного джета скорости горизонтальных и вертикальных дрейфов существенно выше, чем их фоновые движения. Скорости горизонтального дрейфа плазмы составляют, в среднем, ~ 300 – 600 м/с (есть события со скоростями 900–1000 м/с). Скорости вертикальной составляющей дрейфа, также в среднем, составляют 30–50 м/с (есть события со скоростями 100–150 м/с).

Чтобы сопоставить составляющие скоростей дрейфа ионосферной плазмы мы использовали метод наложения эпох. В каждом событии рассматривался 4-часовой интервал измерений скоростей дрейфа: по 2 ч до и после реперного времени. Отметим, что все значения скоростей были нормализованы по максимуму. За реперное время (0 на оси абсцисс) принималось время максимума горизонтальных скоростей во время наблюдения поляризационного джета. По оси ординат откладывались средние значения нормализованных вертикальных скоростей. Результаты анализа приведены на рис. 2, где все события с развитием ПД над Якутском подразделены на 4 ситуации. Было обнаружено, что только в $\sim 28\%$ случаев максимальные значения вертикальных скоростей в полосе поляризационного джета совпадали с максимумом горизонтальных скоростей (1-я ситуация – см. рис. 2а). Оставшиеся события распределены приблизительно в равных пропорциях между еще тремя ситуациями (рис. 2б, в, г): 1) пик вертикальных скоростей за ~ 1 ч до реперного времени; 2) пик вертикальных скоростей спустя ~ 1 ч после реперного времени и 3) два пика вертикальных скоростей: первый за ~ 1 ч до максимума горизонтальных скоростей, второй спустя ~ 1 ч после максимума горизонтальных скоростей.

На рисунке также приведены коэффициенты детерминации (R^2) и значения стандартных отклонений (SD), определенные для уравнений регрессии, в которых зависимости компонентов скорости дрейфа плазмы от времени аппроксимированы полиномами шестой степени, а также количество рассмотренных событий (N).

Природу такого поведения вертикальных скоростей относительно горизонтальных, при несовпадении пиков скоростей и наличии электрического поля северного направления, можно попытаться объяснить следующим образом: пик до реперного времени возникает за счет джоулева нагрева из-за столкновений ионов с нейтралами; далее, при максимуме горизонтальной скорости (в 0 ч) нейтралы уже вовлечены в движение, и разность скоростей меньше и, следовательно, нагрев меньше; после максимума ионы

притормаживают, а нейтралы движутся со старой, приданной им ионами скоростью, разность скоростей снова нарастает и, в результате, снова растет джоулев нагрев и вертикальный вынос.

Могут быть и другие механизмы, объясняющие наличие пиков вертикальных скоростей, например, связанные с продольными токами зон 1 и 2 [Figueiredo et al., 2004].

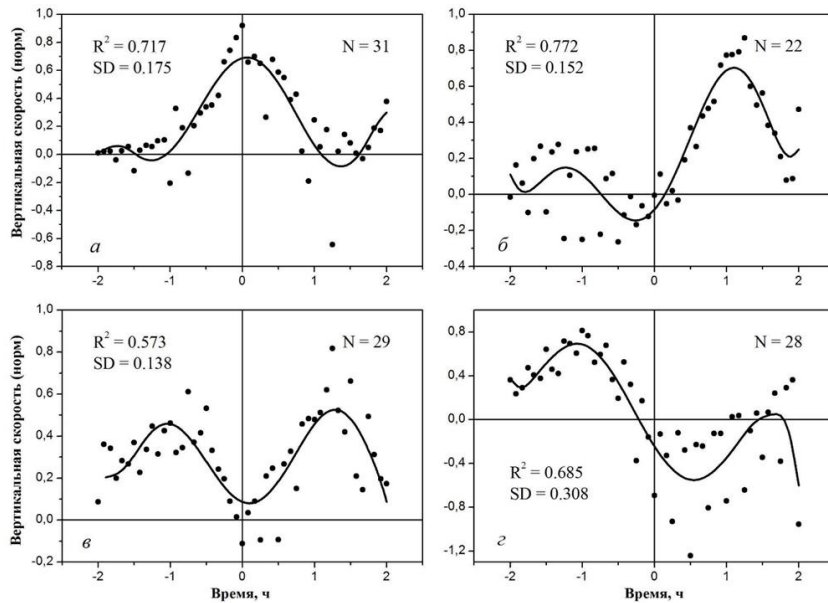


Рисунок 2. Горизонтальные и вертикальные скорости дрейфа ионосферной плазмы в полосе поляризационного джета. Кривые на рисунках – аппроксимирующие линии, точки – нормализованные значения скоростей.

Заключение

1. По наземным доплеровским измерениям на ионосферной ст. Якутск обнаружено, что в периоды наблюдения поляризационного джета скорости горизонтальных и вертикальных дрейфов существенно выше, чем их фоновые значения. Скорости горизонтального дрейфа плазмы составляют, в среднем, ~300–600 м/с (есть события со скоростями 900–1000 м/с). Скорости вертикальной составляющей дрейфа, также в среднем, составляют 30–50 м/с (есть события со скоростями 100–150 м/с).

2. Результаты доплеровских измерений на субавроральной ионосферной станции Якутск показывают, что при развитии поляризационного джета над станцией наблюдения значения пиков вертикальных скоростей дрейфа плазмы относительно пиков горизонтальных скоростей могут не совпадать по времени и направлению, вызывая различные ситуации их взаиморасположения.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания по проекту П.16.2.1 (номер госрегистрации № АААА-А17-117021450059-3) и при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-45-140037) и программы РАН П28.

Список литературы

- Гальперин Ю.И., Пономарев В.Н., Зосимова А.Г. Прямые измерения скорости дрейфа ионов в верхней ионосфере во время магнитной бури // Космич. исслед. Т. 11. Вып. 2. С. 273–296. 1973.
- Степанов А.Е., Халипов В.Л., Голиков И.А., Бондарь Е.Д. Поляризационный джет: узкие и быстрые дрейфы субавроральной ионосферной плазмы. Якутск: Издательский дом СВФУ, 176 с. 2017.
- 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.
- Figueiredo S., Karlsson T., Marklund G. T. Investigation of subauroral ion drifts and related field-aligned currents and ionospheric Pedersen conductivity distribution // Ann. Geophysicae. V. 22. N 3. P. 923–934. 2004.
- Foster J.C., Burke W.J. SAPS: A new categorization for subauroral electric fields // EOS Trans. AGU. V. 83. P. 393–394. 2002.
- Galperin Yu.I., Khalipov V.L., Filippov V.M. Signature of rapid subauroral ion drifts in the high-latitude ionosphere structure // Ann. Geophys. V. 4. N A2. P. 145–154. 1986.
- The digisonde portable sounder – DPS. Technical manual. Ed. Reinisch B. University of Massachusetts. Lowell Center for Atmospheric Research. USA. 221p. 2007.
- Yeh H.C., Foster J.C., Rich F.J., Swider W. Storm time electric field penetration observed at mid-latitude // J. Geophys. Res. V. 96. N A4. P. 5707–5721. 1991.