

УДК 550.388.2

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ ДРЕЙФОВ ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ В ОБЛАСТИ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ДЖЕТА

© 2019 г. А. Е. Степанов^{1, *}, В. Л. Халипов^{2, **}, С. Е. Кобякова¹, Г. А. Котова²¹Институт космофизических исследований и аэронауки
им. Ю.Г. Шафера СО РАН (ИКФИА СО РАН), г. Якутск, Россия²Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), г. Москва, Россия

*e-mail: a_e_stepanov@ikfia.ysn.ru

**e-mail: khalipov@iki.rssi.ru

Поступила в редакцию 25.12.2018 г.

После доработки 25.02.2019 г.

Принята к публикации 23.05.2019 г.

По данным доплеровских измерений на субавроральной ионосферной станции 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 ситуации, где первая ситуация – это когда значения вертикальных скоростей в полосе поляризационного джета достигали максимума одновременно с горизонтальными скоростями. В двух других ситуациях 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.

DOI: 10.1134/S0016794019050134

1. ВВЕДЕНИЕ

Поляризационный джет (ПД) – узкая полоса быстро 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 – субавроральный поляризационный поток (SubAuroral Polarization Stream) [Foster and Burke, 2002]. Под этим термином авторы объединили два вида наблюдений субавроральных 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 подчитать 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.

2. 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 субавроральных станций подробно описано в работах [Galperin

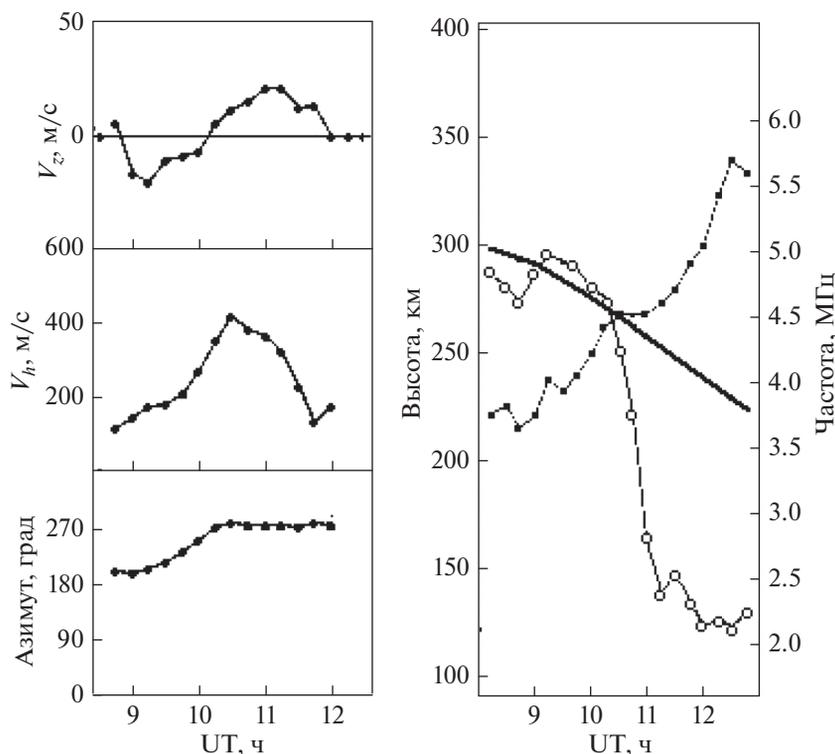


Рис. 1. Вариации скоростей дрейфа ионосферной плазмы (слева) и ионосферных параметров (справа) над Якутском 4 сентября 2016 г.

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 квадратики). Здесь же жирной черной линией показан прогнозный ход критической 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.

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

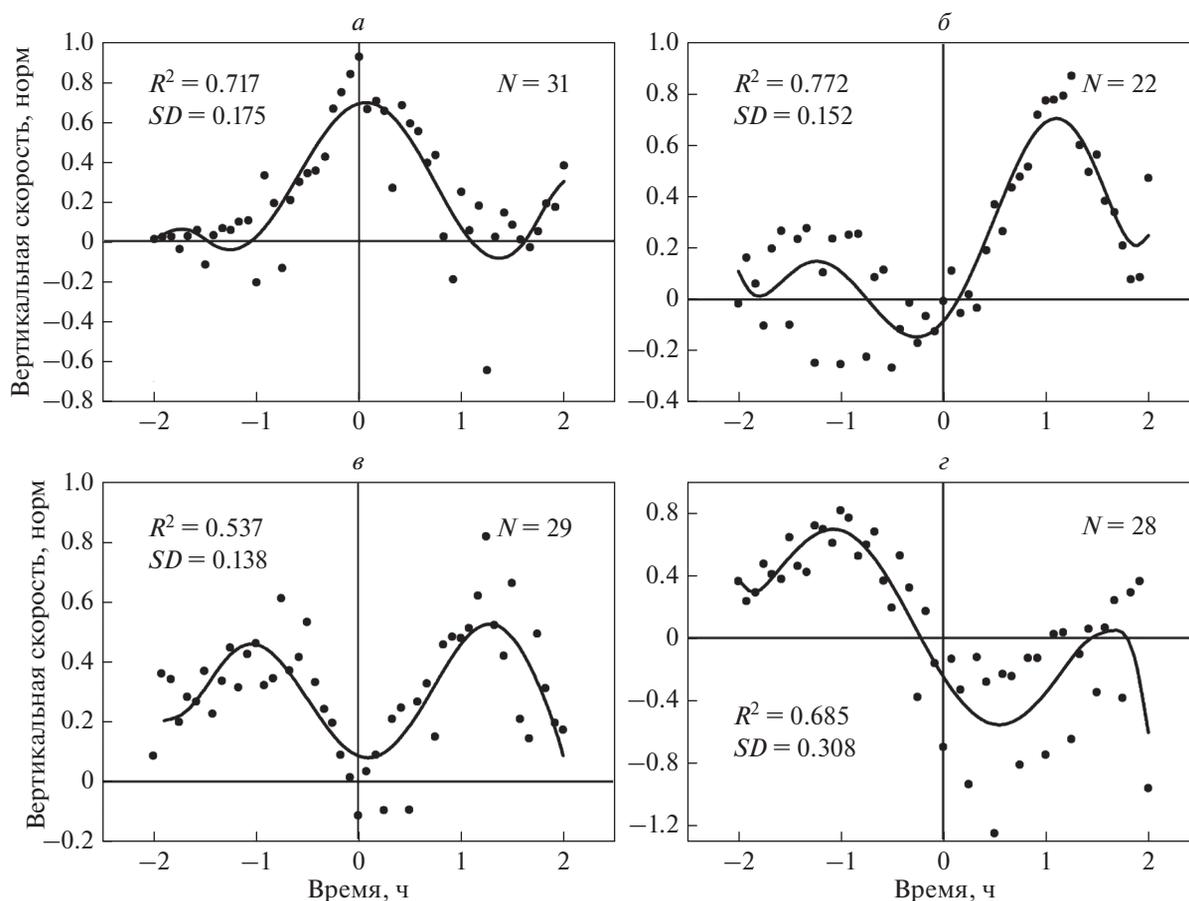


Рис. 2. Горизонтальные и вертикальные скорости дрейфа ионосферной плазмы в полосе поляризационного джета. Кривые на рисунках – аппроксимирующие линии, точки – нормализованные значения скоростей.

ПД над Якутском подразделены на 4 ситуации. Было обнаружено, что только в ~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 2 также приведены коэффициенты детерминации (R^2) и значения стандартных отклонений (SD), определенные для уравнений регрессии, в которых зависимости компонент 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 электриче-

ского 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].

3. 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.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований грант № 18-45-140037 и программы РАН П7.

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. № 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. № A2. P. 145–154. 1986.

– The digisonde portable sounder – DPS. Technical manual. Ed. Reinisch B. University of Massachusetts. Lowell Center for Atmospheric Research. USA. 221 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. № A4. P. 5707–5721. 1991.