

ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЙ ДЖЕТ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ СПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ НАВИГАЦИИ GPS

С.И. Данилов, А.Е. Степанов, А.Ю. Гололобов

Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю. Г. Шафера СО РАН, г Якутск, Россия,
danilov@ikfia.ysn.ru

POLARIZATION JETS FROM GPS SATELLITE NAVIGATION SYSTEM MEASUREMENTS

S.I. Danilov, A.E. Stepanov, A.Yu. Gololobov

Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy of SB RAS, Yakutsk, Russia,
danilov@ikfia.ysn.ru

Аннотация. В данной работе представлены материалы по определению поляризационного джета по данным измерений спутниковой системы навигации GPS. Данные измерений GPS позволяют вычислять полное электронное содержание (ПЭС) вдоль траектории луча. Установлено, что резкие падения ПЭС совпадают с временем наблюдения поляризационного джета по данным наземной станции Якутск и спутника DMSP F-17.

Ключевые слова: GPS, поляризационный джет, ионосфера, плазма.

Abstract. This paper presents materials on the determination of polarization jets from measurements of the GPS satellite navigation system. The GPS measurement data allows us to calculate the total electron content (TEC) along the beam trajectory. It was found that the sharp drops of TEC coincide with the time of observation of the polarization jet according to the data of the Yakutsk ground-based station and the DMSP F-17 satellite.

Keywords: GPS, polarization jet, ionosphere, plasma.

ВВЕДЕНИЕ

Поляризационный джет (ПД) — это узкая полос плазмы, движущаяся в западном направлении в области плазмопаузы и наиболее заметно проявляющаяся во время магнитных бурь. В ионосфере существование поляризационного джета приводит к целому ряду изменений, создающих плазменные неоднородности, которые хорошо регистрируются с поверхности Земли с помощью ионозондов и нарушают распространение радиоволн, т.е. влияют на космическую погоду.

Дрейфы плазмы со скоростями выше 1000 м/сек в вечернем секторе приводят к образованию узких провалов ионизации в результате выноса плазмы к предполуденному сектору в зоне действия джета [Степанов и др., 2019]. Многие наземные и спутниковые измерения показывают, что ширина ПД составляет от 100 до 200 км (1° – 2°). ПД наблюдается преимущественно в предполночном (18:00–24:00 MLT) секторе на инвариантных широтах 55° – 65° [Степанов и др., 2017].

Global Positioning System (GPS) является одной из глобальных спутниковых систем навигации. Система GPS состоит из 32 спутников, вращающихся по шести круговым орбитам на высоте порядка 20200 км и периодом обращения 11 ч 58 мин. Данные измерений спутников позволяют рассчитывать полное электронное содержание электронов (ПЭС) в ионосфере, что позволяет вести непрерывные наблюдения за состоянием ионосферы.

Целью настоящей работы является исследование возможности определения поляризационного джета на основе данных измерений спутниковых систем навигации, и сопоставление полученных результатов с измерениями поляризационного джета с наземной ионосферной станции Якутск и спутников серии DMSP.

ДААННЫЕ

Расчет ПЭС по данным измерений спутниковых навигационных систем основан на дисперсионной

зависимости показателя преломления радиоволн, проникающих через ионосферу. В поле зрения приемника GPS всегда находится как минимум 8 непрерывно перемещающихся спутников, что позволяет получать данные о распределении ПЭС в пространстве и времени. Данные измерений спутниковых систем навигации хранятся в формате RINEX (The Receiver Independent Exchange Format). Файл содержит в себе исходные данные необходимые для расчета ПЭС (псевдодальности P1 и P1, фазы L1 и L2) [Терещенко, 2015]. В настоящей работе данные RINEX получены с сайта <https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/data/daily>.

Измерения ионосферы на станции Якутск проводится ионозондом DPS-4. DPS-4 представляет собой приемо-передающий комплекс, способный измерять в реальном времени характеристики физических параметров ионосферы. Конечный результат зондирования, который называется ионограммой, включает амплитуды отраженного от ионосферы сигнала в зависимости от частоты и высоты.

DMSP (Defense Meteorological Satellite Program) - программа мониторинга Земли, разработанная и запущенная в 1962 г., позволяющая вести наблюдения за состоянием верхней атмосферы Земли. В данном исследовании использованы данные измерений спутника DMSP F-17, которая движется по околополярной орбите, с наклоном около $98,8^\circ$ и периодом обращения около 102 мин [Burke et al., 2011]. Спутниковые данные были получены с официального сайта проекта DMSP (<https://dmsp.bc.edu/index.html>).

Для расчетов ПЭС использована программа «GPS-TEC analysis» [Seemala, 2023]. В период с 12 по 14 ноября 2012 г. наблюдалась магнитная буря. В этот период производились одновременные наблюдения признаков ПД по данным наземной Якутской ионосферной станции и спутника DMSP F-17.

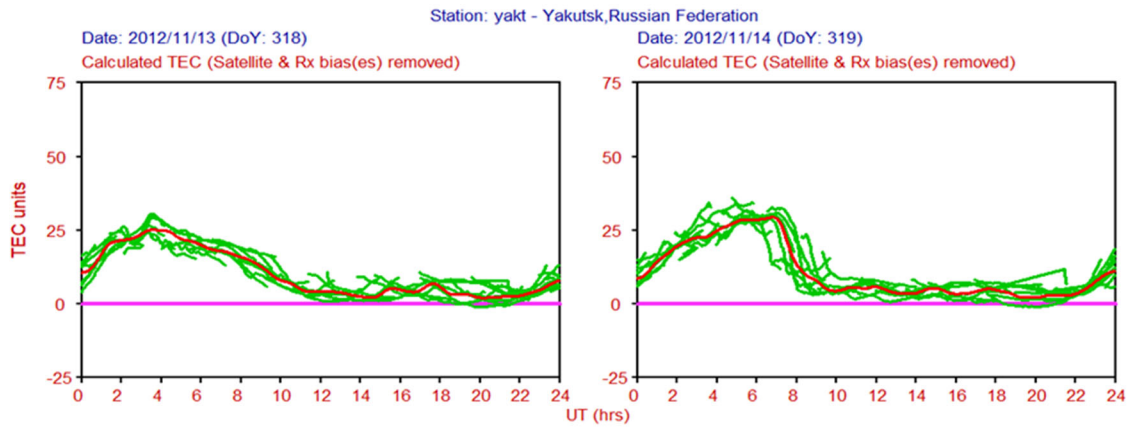


Рис. 1. Расчёты ПЭС станции Якутск за 13 и 14 ноября 2012 г. По оси абсцисс время по UT, а по оси ординат значение ПЭС. Зеленые кривые — расчеты по данным отдельных спутников, а красная кривая — их среднее значение

**АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ
ЗА 14 НОЯБРЯ 2012 ГОДА**

На рис. 1 показаны расчеты ПЭС с приемника на станции Якутск за 13 и 14 ноября 2012 г. Зелеными кривыми обозначены рассчитанные ПЭС по данным отдельных спутников, а красной линией показано их среднее значение. Видно, что 14 ноября в суточном ходе наблюдается резкое падение ПЭС (срыв) с 07:00 до 09:00 UT. Как будет показано ниже, примерно в то же время на ионограммах наземной ионосферной станции и данных спутника DMSP F-17 регистрировались признаки ПД. Т.к. магнитная буря продолжалась 2 сут, было проведено сопоставление рассчитанных ПЭС с данными предыдущего дня — 13 января 2012 г., когда ПД не регистрировался. На расчетах видно, что в суточном ходе ПЭС 13 января 2012 г. отсутствует резкое падение ПЭС.

В вечернем секторе 14 ноября на фоне сильной магнитной бури, которая продолжалась 44 ч, ионосферная станция Якутск зарегистрировала признаки поляризационного джета (рис. 2). Основными ионосферными признаками проявления джета по наземным данным являются резкие уменьшения критических частот f_oF2 с ~8 МГц до ~3 МГц и F3s-отражения на ионограммах вертикального зондирования (ВЗ), указывающие на появление узкого глубокого минимума (провала) концентрации электронов. Kp -индекс за этот день был равен: 6- 6+ 6- 4+ 4- 2 1- 1+.

В этот же период около 08 UT спутник DMSP F17 зафиксировал признак ПД в виде резкого падения концентрации электронов и ионов и увеличения горизонтальной скорости V_{horz} до более 1500 м/с (рис. 3). Это свидетельствует о том, что резкое падение ПЭС в суточном ходе связано с формированием ПД.

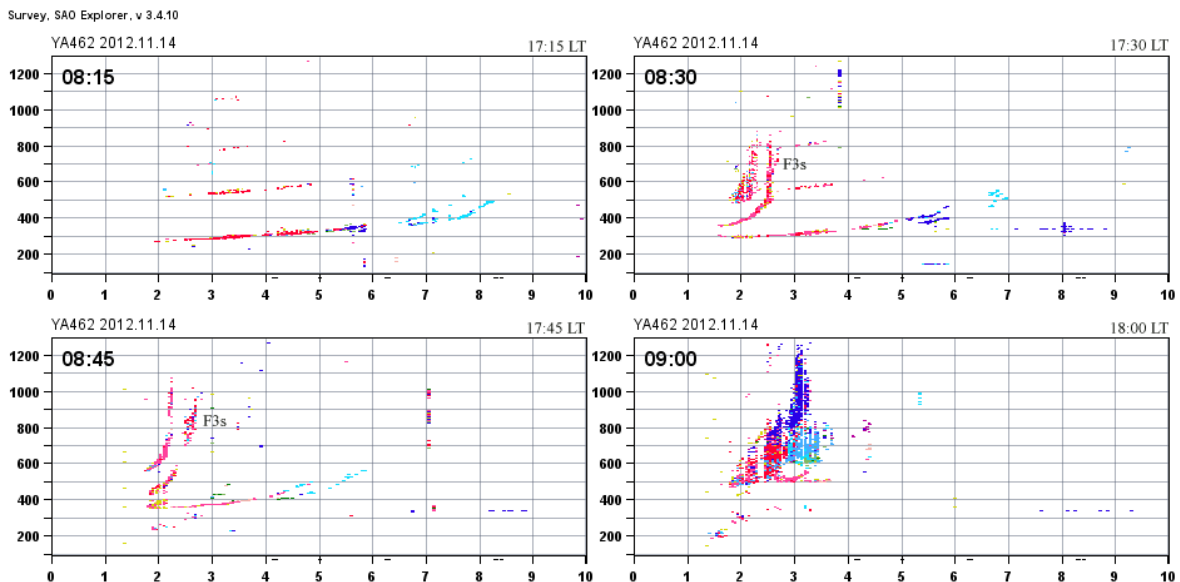


Рис. 2. Последовательность ионограмм станции Якутск 14 ноября 2012 г. По оси абсцисс — частота в МГц, а по оси ординат — высота в километрах

DMSP F17A – 14–Nov–2012 (Day 319)

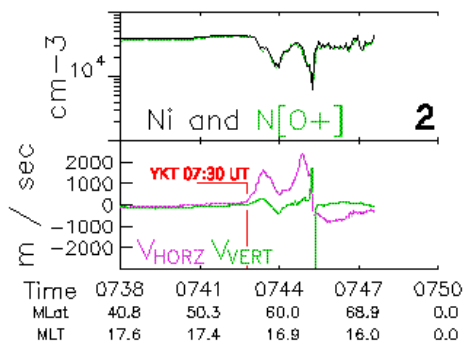


Рис. 3. Данные спутника DMSP F17. По оси абсцисс время по UT, магнитная широта MLat и местное магнитное время MLT, а по осям ординат концентрация ионов и скорость в м/с

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данные измерений GPS показали, что резкое падение ПЭС в суточном ходе совпадает по времени с наблюдением поляриционного джета по данным наземной ионосферной станции Якутск и спутника DMSP F17 и может являться признаком ПД. Дальнейшие исследования с привлечением данных

измерений спутниковых систем навигации раскрывают дополнительные возможности изучения поляриционного джета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Степанов А.Е., Кобякова С.Е., Халипов В.Л. Наблюдение быстрых субавроральных дрейфов ионосферной плазмы по данным якутской меридиональной цепочки станций // Солнечно-земная физика. 2019. Т. 5, № 4. С. 73–79.

Степанов А.Е., Халипов В.Л., Голиков И.А., Бондарь Е.Д. Поляриционный джет: узкие и быстрые дрейфы субавроральной ионосферной плазмы. Якутск: Издательский дом СВФУ, 2017. 176 с.

Терещенко Е.Д., Миличенко А.Н., Швец М.В. и др. Определение полного электронного содержания по сигналам спутников глобальной навигационной системы ГЛОНАСС // Вестник Кольского НЦ РАН. 2015. Т. 20, № 1. С. 32–43.

Burke W.J., Wilson G.R., Lin C.S. et al. Estimating Dst indices and exospheric temperatures from equatorial magnetic fields measured by DMSP satellites // J. Geophys. Res. 2011. V. 116, A01205. doi:10.1029/2010JA015310.

Seemala G.K. Chapter 4 – Estimation of ionospheric total electron content (TEC) from GNSS observations // Atmospheric Remote Sensing. 2023. P. 63–84. doi.org/10.1016/B978-0-323-99262-6.00022-5.