

**ВРЕМЯ ЖИЗНИ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ДЖЕТА
ПРИ ДЛИТЕЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ БУРЯХ****LIFETIME OF A POLARIZATION JET DURING LONG-TERM MAGNETIC STORMS****А.Е. Степанов***Институт космических исследований и аэронауки
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
Якутск, Россия, a_e_stepanov@ikfia.ysn.ru***С.И. Данилов***Институт космических исследований и аэронауки
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
Якутск, Россия, danilov@ikfia.ysn.ru***Д.Г. Байшев***Институт космических исследований и аэронауки
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
Якутск, Россия, baishev@ikfia.ysn.ru***В.Л. Халипов***Институт космических исследований РАН,
Москва, Россия, khalipovvictor@mail.ru***Г.А. Котова***Институт космических исследований РАН,
Москва, Россия, kotova@iki.rssi.ru***С.Е. Кобякова***Институт космических исследований и аэронауки
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
Якутск, Россия, s.e.kobyakova@ikfia.ysn.ru***A.E. Stepanov***Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research
and Aeronomy SB RAS,
Yakutsk, Russia, a_e_stepanov@ikfia.ysn.ru***S.I. Danilov***Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research
and Aeronomy SB RAS,
Yakutsk, Russia, danilov@ikfia.ysn.ru***D.G. Baishev***Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research
and Aeronomy SB RAS,
Yakutsk, Russia, baishev@ikfia.ysn.ru***V.L. Khalipov***Space Research Institute RAS,
Moscow, Russia, khalipovvictor@mail.ru***G.A. Kotova***Space Research Institute RAS,
Moscow, Russia, kotova@iki.rssi.ru***S.E. Kobyakova***Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research
and Aeronomy SB RAS,
Yakutsk, Russia, s.e.kobyakova@ikfia.ysn.ru*

Аннотация. В работе рассматриваются условия появления и характерные временные масштабы поляризационного джета во время сильных и длительных геомагнитных бурь на основе измерений ионосферных параметров на спутниках серии DMSP ($h \sim 830$ км) и на наземной ионосферной станции «Якутск» (YA462). Поляризационный джет на ионосферной станции «Якутск» регистрировался в вечернем секторе на фоне суббуревых возмущений, когда геомагнитный индекс SME достигал от 1000 до ~ 3000 нТл и по данным магнитной обсерватории «Якутск» (YAK) наблюдались положительные бухты величиной $\sim 50\text{--}100$ нТл в H -компоненте и $\sim 100\text{--}200$ нТл в Z -компоненте магнитного поля Земли. Показано, что время существования поляризационного джета, или узких провалов ионосферной плазмы в субавроральной ионосфере, во время сильных и длительных магнитных бурь может достигать 12 ч.

Ключевые слова: ионосфера, магнитосфера, поляризационный джет, SME -индекс, дрейф плазмы, узкий провал, магнитная буря и суббуря.

Abstract. The paper examines conditions of occurrence and typical time scales of a polarization jet by measuring ionospheric parameters from DMSP satellites ($h \sim 830$ km) and using data from the ground-based ionospheric station Yakutsk (YA462) during strong and long-term geomagnetic storms. The polarization jet at the ionospheric station Yakutsk was recorded in the dusk sector at the background of substorm disturbances when the geomagnetic index SME reached values from 1000 to ~ 3000 nT, and, according to data from the magnetic observatory Yakutsk (YAK), there was a positive bay $\sim 50\text{--}100$ nT in the geomagnetic field H component and $\sim 100\text{--}200$ nT in its Z component. We show that the lifetime of the polarization jet or narrow troughs in ionospheric plasma in the subauroral ionosphere during strong and long-term magnetic storms can be as long as 12 hrs.

Keywords: ionosphere, magnetosphere, polarization jet, SME index, plasma drift, narrow trough, magnetic storm and substorm.

ВВЕДЕНИЕ

Поляризационный джет (ПД) — это узкая полоса ионосферной плазмы, быстро движущейся (со скоростью до нескольких километров в секунду) в западном направлении в области ионосферной проек-

ции плазмопаузы. Наиболее заметно ПД проявляется во время магнитных бурь [Степанов и др., 2017 и ссылки в ней]. ПД обуславливает структурные модификации высокоширотной ионосферы и, соответственно, влияет на условия распространения радиоволн.

Быстрые ионные дрейфы в западном направлении вблизи проекции плазмопаузы на высотах области F впервые были обнаружены Ю.И. Гальпериным и др. [1973] по данным спутника «Космос-184» и получили название «поляризационный джет». С тех пор поляризационные джеты (ПД), или быстрые западные дрейфы ионосферной плазмы на субавроральных широтах, активно изучаются наземными и спутниковыми методами (см., например, [Гальперин и др., 1990; He et al., 2014; Степанов и др., 2017] и ссылки в них). Было выявлено, что регистрация на ионограммах вертикального и возвратно-наклонного зондирования ионосферы характерных следов отражений F3s указывает на существование в ионосфере вблизи зенита станции наблюдения поляризационного джета, или узких струй ионосферной плазмы, движущихся в западном направлении.

Показано, что узкие потоки плазмы со скоростями выше 200–400 м/с приводят в вечернем секторе к образованию узких провалов плотности ионов в результате выноса ионосферной плазмы в вечерне-последополуденный сектор. Многие наземные и спутниковые измерения ПД показывают, что провал имеет широтный размер 100–200 км, или 1–2°, наблюдается в основном в вечерне-предполуночном секторе местного времени (18:00–24:00 MLT) на инвариантных широтах 55–65°; типичная скорость дрейфа плазмы в ПД составляет ~1–1.5 км/с [Степанов и др., 2017], а максимальная может достигать 4–5 км/с.

В работе 1979 г. Spiro R.W., Heelis R.A. и Hanson W.B. из Центра космических наук университета Техаса назвали узкие быстрые потоки плазмы на субавроральных широтах, наблюдавшиеся спутником Atmosphere Explorer C, «субавроральным ионным дрейфом» — SAID (SubAuroral Ion Drifts) [Spiro et al., 1979].

Поляризационный джет всегда наблюдается экваториальнее границы авроральных электронных высыпаний и смешается на более низкие широты по мере роста геомагнитной активности [Anderson et al., 1991]. Недавно была выявлена связь ПД со STEVE (Strong Thermal Emission Velocity Enhancement), т. е. с «сильными повышениями скорости теплового излучения» [MacDonald et al., 2018]. С помощью камеры всего неба 25 июля 2016 г. MacDonald et al. [2018] зарегистрировали событие STEVE как узкую субавроральную видимую структуру южнее аврорального овала. По одновременным данным спутника SWARM было показано, что STEVE находится на тех же силовых линиях, что и расположенная выше в ионосфере узкая полоса сильного западного потока ионов.

Термины «поляризационный джет» и «SAID» до сих пор являются самыми распространенными для обозначений узких, быстрых потоков ионосферной плазмы, направленных к западу, на субавроральных широтах. Наряду с этими терминами часто используется термин SAPS (Subauroral Polarization Stream), который ввели Foster и Burke [2002] с целью подчеркнуть, что в условиях умеренной и слабой магнитной возмущенности ПД/SAID существует в виде более широкого и менее интенсивного потока плазмы на субавроральных широтах.

Заметим, что исследования временных масштабов поляризационных джетов во время интенсивных и продолжительных магнитных бурь еще не проводились.

Целью настоящей работы является исследование временной продолжительности узких провалов ионизации и повышенных скоростей дрейфа плазмы при развитии поляризационного джета по измерениям на спутниках серии DMSP и на наземной ионосферной станции «Якутск» (YA462).

МЕТОДЫ НАБЛЮДЕНИЙ И АНАЛИЗ ДАННЫХ

В работе используются данные спутников проекта DMSP (Defense Meteorological Satellite Program), предоставляющего оперативную солнечно-геофизическую информацию [<https://dmsp.bc.edu>]. Спутники располагаются на высоте около 830 км на почти круговой полярной орбите с наклоном 98.8° и имеют период обращения 102 мин. Для анализа геомагнитной обстановки используется K_p -индекс, который является количественной мерой авроральных интенсификаций [<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/kp/index.html>].

Наземные данные получены станциями цепочки «Якутск»—«Жиганск»—«Тикси», оборудованными автоматическими ионосферными станциями типа АИС [Васильев и др., 1961] и оснащенными антенными системами РГ для возвратно-наклонного зондирования [Айзенберг, 1962], что существенно увеличивает объем получаемой информации за счет расширения интервала зондируемых широт. В 2002–2003 гг. ст. «Якутск» и «Жиганск» были оснащены цифровыми ионосферными станциями DPS-4 [Reinisch, 1987; Reinisch et al., 1992].

Для идентификации ПД по наземным данным использовались дополнительные отражения F3s на меньших частотах и на большей дальности, чем регулярные фоновые следы на ионограммах вертикального зондирования. F3s-отражения соответствуют узким быстрым потокам плазмы вблизи зенита станции наблюдения (см. [Халипов и др., 2001; Степанов и др., 2017] и ссылки там). После появления на ионограммах таких отражений критические частоты фонового слоя F2 уменьшаются в течение 15–30 мин на 2–4 МГц и более, т. е. происходит «срыв» частоты, который четко прорисовывается на суточных f -графиках [Степанов и др., 2016, 2019].

Событие 20 октября 1989 г.

Увеличения интенсивности энергичных ионов вследствие прохождения ударной волны, сопровождающиеся сильными магнитными бурями и магнитосферными суббурями, исторически называются событиями энергичных буревых частиц. Такое событие произошло 20 октября 1989 г. [Lario, Decker, 2002]. K_p -индексы в этот день составляли 2+, 3, 4+, 7–, 8, 8+, 7, $\Sigma K_p=47$.

Поляризационный джет в Северном полушарии был зарегистрирован 20.10.1989 двумя спутниками DMSP — F8 и F9. На рис. 1 панели с цифрами в верх-

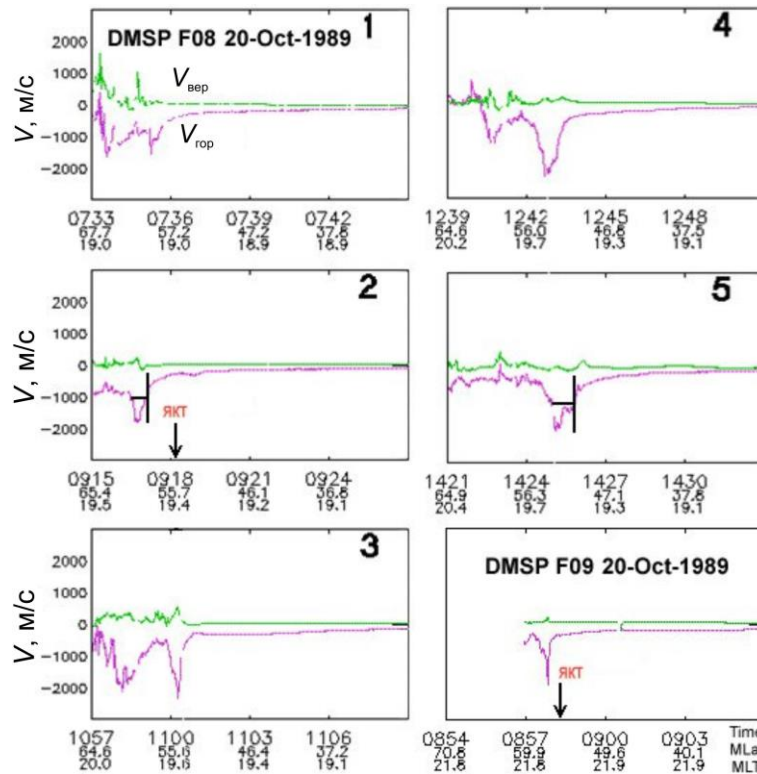


Рис. 1. Параметры плазмы ПД в субавроральной ионосфере. В правом верхнем углу цифрами отмечены номера пролетов спутника DMSP F8, стрелками показана магнитная широта ст. «Якутск», перпендикулярными черными линиями — полуширина и горизонтальная скорость джета. По оси ординат отложены горизонтальная V_{top} (розовая кривая) и вертикальная $V_{вер}$ (зеленая кривая) скорости дрейфа ионов, по оси абсцисс — мировое время (UT), магнитная широта (MLat) и магнитное местное время (MLT)

нем правом углу соответствуют последовательным пролетам спутника F8, а нижняя правая панель — пролету спутника F9. На оси ординат отрицательные значения соответствуют западному направлению движения ионосферной плазмы. Черными перпендикулярными линиями на рис. 1 обозначены полуширина и горизонтальная скорость ПД соответственно, а стрелкой отмечена магнитная широта ст. «Якутск».

Первый признак ПД по данным спутника F8 зарегистрирован в 07:35 UT на широте $\sim 56^\circ$ MLat, когда скорость горизонтального дрейфа плазмы достигла ~ 1500 м/с (см. рис. 1, панель 1). На следующем пролете этого же спутника виден уже оформившийся узкий поток плазмы с полушириной около 2° (полуширина — это ширина ПД на половинном значении горизонтальной скорости, которая схематично показана на втором пролете спутника). Здесь же приведено положение наземной ст. «Якутск» (MLat = 55.6°), где был зарегистрирован признак ПД в 09:15 UT (18:15 LT). В 14:26 UT полуширина ПД (области высоких горизонтальных скоростей ионов или узких провалов ионизации) выросла до 4° магнитной широты, т. е. узкий провал начинает преобразовываться в широкий, или в главный ионосферный провал [Халипов и др., 1977; Мамруков, Филиппов, 1988].

Спутник F9 (рис. 1, внизу справа) в этот день зарегистрировал ПД только в одном пролете — в 08:58 UT, почти одновременно с наземной станцией «Якутск», на которой ПД наблюдался в 09:15 UT, при том что

разность по долготе с этой станцией составляла почти 4 ч или около 60° .

Спутник F8 регистрировал узкие провалы ионизации в пяти пролетах, с 07:35 до 14:26 UT, т. е. около 7 ч.

Мы используем индекс авроральной активности *SME*, который позволяет более точно, чем *AE*-индекс, оценить интенсивность аврорального электроджета [Newell, Gjerloev, 2011; Бороев, Васильев, 2021]. Формулы расчетов индексов *AE* и *SME* совпадают, но *AE*-индекс вычисляется по *H*-компоненте на двенадцати высокоширотных магнитовариационных станциях, расположенных в узкой полосе геомагнитных широт 65° – 70° , тогда как для расчета *SME*-индекса используется более 100 станций проекта SuperMAG на геомагнитных широтах от 40° до 80° [Gjerloev, 2009, 2012; Newell, Gjerloev, 2014; <http://supermag.jhuapl.edu/info>].

На рис. 2 приведены вариации *SME*-индекса 20 октября 1989 г.; интервал непрерывных наблюдений ПД по спутниковым измерениям (DMSP F8 и F9) отмечен горизонтальной линией. Вертикальная стрелка показывает время регистрации ПД на ст. «Якутск».

Регистрация ПД 20 октября 1989 г. в Якутске почти совпала с внезапным началом (SSC, Storm Sudden Commencement) очень сильной магнитной бури в 09:16 UT. Заметим, что ранее в наших работах [Халипов и др., 2001; Степанов и др., 2008] сопоставлялось появление ПД с резким ростом *AE*-индекса, т. е. не с SSC, а с началом суббури.

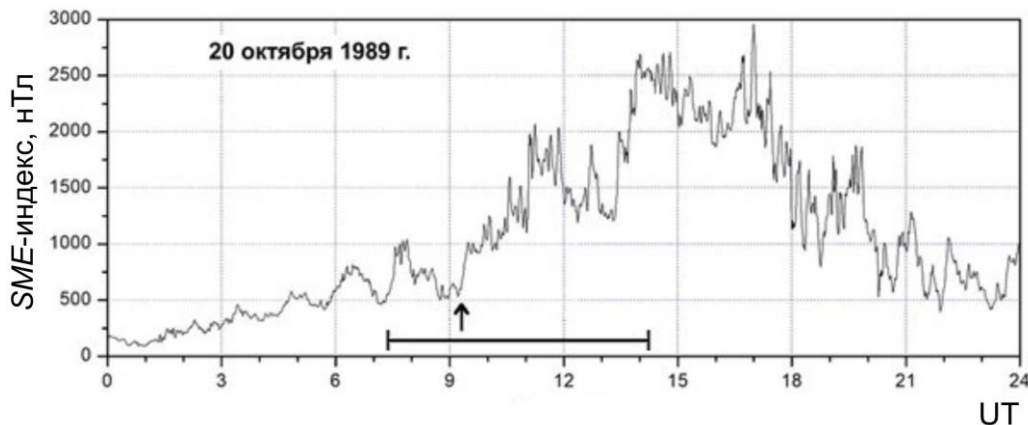


Рис. 2. Вариации *SME*-индекса 20 октября 1989 г.: горизонтальный отрезок — интервал наблюдения ПД по спутниковым измерениям, вертикальная стрелка — время регистрации ПД на ст. «Якутск»

Dst-индекс в 09:00 UT составлял -45 нТл, а минимальное значение $Dst_{\min} = -202$ нТл наблюдалось в 16:00 UT, т. е. уже после регистрации ПД в Якутске.

В вариациях *SME*-индекса видны два кратковременных усиления магнитной активности интенсивностью более 750 нТл в 05:50–08:00 UT. Регистрация ПД в Якутске в 09:15 UT совпала с началом резкого усиления магнитной активности: *SME*-индекс увеличился от ~ 500 нТл в 09:15 UT до 2000 нТл в 11:00 UT. На рис. 2 видно также, что регистрация ПД со спутников началась еще до наблюдения его на наземной станции.

Событие 26 августа 1998 г.

Примерно в 06:51 UT 26 августа 1998 г. плазма солнечной вспышки провзаимодействовала с магнитосферой Земли, вызвав SSC сильной геомагнитной бури, которая продолжалась до 29 августа [Магнитные бури, 2005]. K_p -индексы за 26 августа 1998 г. составляли 2, 2+, 5-, 6-, 5-, 6-, 6-, 6+, $\Sigma K_p = 37$.

На рис. 3 приведены спектрограммы ионных и электронных высыпаний, вариации плотности ионов N_i , горизонтальной $V_{\text{гор}}$ и вертикальной $V_{\text{вер}}$ скорости дрейфа ионов при пролете спутника вблизи меридиана ст. «Якутск» 26 августа 1998 г. Вертикальной линией на рисунке показан момент регистрации ПД (12:35 UT), которому соответствуют узкий глубокий провал в ионной плотности и резкое усиление горизонтальной скорости дрейфа ионосферной плазмы в западном направлении до ~ 3 км/с. Ширина субпровала в середине (полуширина) составляет 1.63° . Видно, что эти явления происходят на экваториальном краю высыпаний ионов и электронов (см., например, [Степанов и др., 2017]).

На рис. 4 приведены параметры плазмы, зарегистрированные спутником DMSP F14 26 августа 1998 г. На средней левой панели (пролет 2, номера пролетов указаны внизу) отмечено положение ст. «Якутск», где в 13:00 UT (22:00 LT) на ионограммах были зарегистрированы признаки ПД. При пролете 3 наблюдались два пика горизонтальных скоростей, подобные тем, которые исследовались в работе [Синевич и др., 2021]. Максимальная полуширина ПД наблюдалась

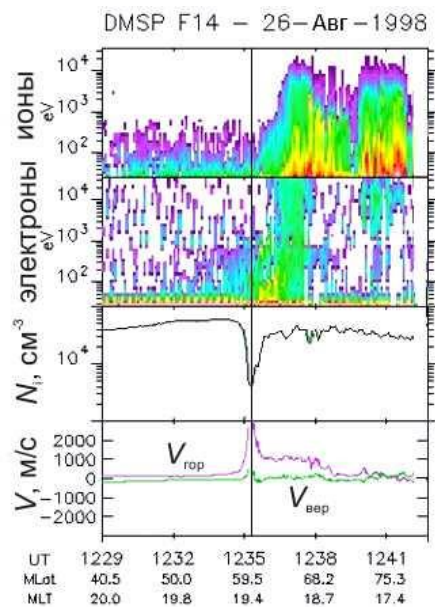


Рис. 3. Параметры ПД 26 августа 1998 г., измеренные спутником DMSP F14 при пролете вблизи меридиана ст. «Якутск»: горизонтальная $V_{\text{гор}}$ (розовая кривая) и вертикальная $V_{\text{вер}}$ (зеленая кривая) скорости дрейфа ионов, ионная плотность N_i (черная кривая) и спектрограммы ионных и электронных высыпаний. Вертикальная линия отмечает момент регистрации ПД

при пролете 5 и составляла $\sim 4^\circ$ MLat, при этом горизонтальная скорость дрейфа ионов упала до 1500–1600 м/с.

На рис. 4 движению ионосферной плазмы на запад соответствуют положительные значения скоростей. На спутниках DMSP по данным дрейфметров скорость определяется в системе координат, связанной с анализатором ионов с тормозящим потенциалом (Retarding Potential Analyzer, RPA) [https://dmsp.bc.edu/html2/ssiesgeneral.html]. Поскольку спутник F14 пролетал в противоположном направлении, чем спутники F8, F9, то значения скорости по данным спутника F14 меняют знак на противоположный относительно скоростей, представленных на рис. 1 [https://dmsp.bc.edu/html2/ssiesdrifcartoon.gif]. Таким образом, спутники F8, F9, F14 регистрируют

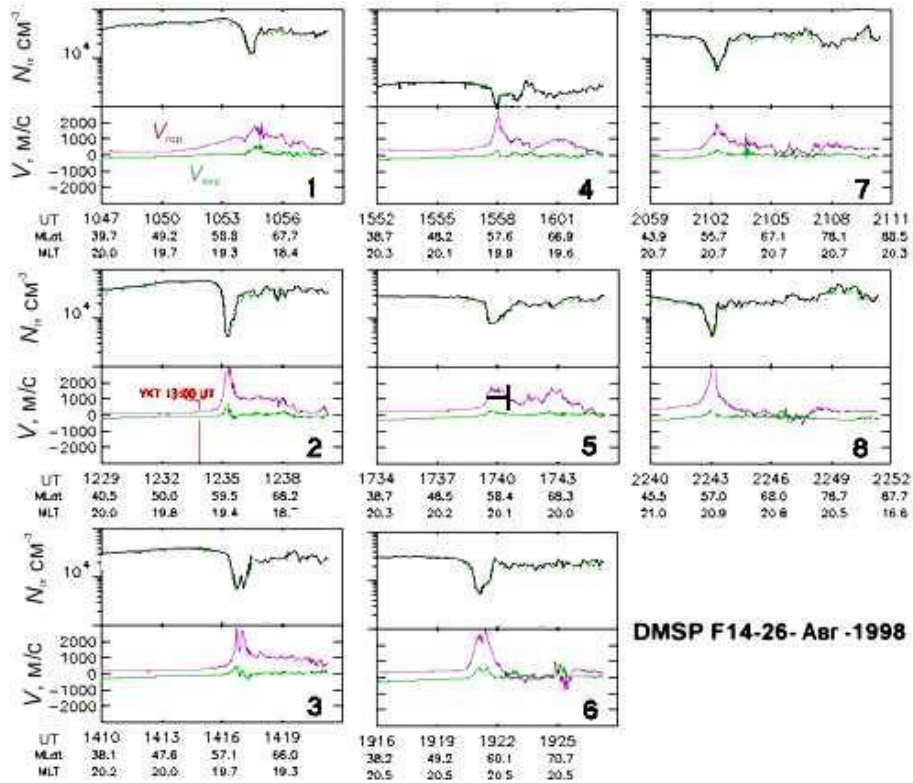


Рис. 4. Горизонтальная $V_{гор}$ (розовая кривая) и вертикальная $V_{вер}$ (зеленая кривая) скорости дрейфа ионов, ионная плотность N_i (черная кривая) 26 августа 1998 г., зарегистрированные спутником DMSF F14, который наблюдал ПД в течение 12 ч. В пролете 3 наблюдались два пика горизонтальной скорости выше 2000 м/с

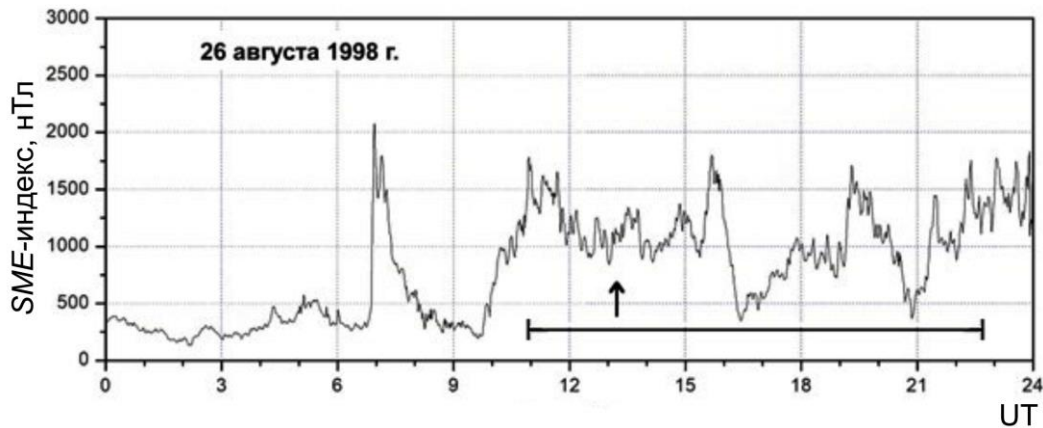


Рис. 5. Вариации SME-индекса 26 августа 1998 г.: горизонтальный отрезок — интервал наблюдения ПД по измерениям со спутника F14, а вертикальная стрелка — время регистрации ПД на ст. «Якутск»

узкую полосу ионосферной плазмы, движущейся в западном направлении, что и должно наблюдаться в поляризационном джете.

Поляризационный джет в Якутске в 13:15 UT 26 августа 1998 г. зарегистрирован в период развития сильной магнитной бури с SSC в 06:51 UT. Dst -индекс в 13:00 UT составлял -23 нТл, $Dst_{min} = -155$ нТл наблюдался в 10:00 UT 27 августа 1998 г., т. е. после регистрации ПД в Якутске.

Воздействие фронта ударной волны солнечного ветра на магнитосферу Земли проявляется в вариациях SME-индекса (рис. 5) как кратковременный всплеск интенсивностью более 2000 нТл в интервале 06:51–08:00 UT [Магнитные бури, 2005]. Поляризационный джет в Якутске 26 августа 1998 г. зарегистрирован

в 13:15 UT (вертикальная стрелка на рис. 5), что совпадает с периодом возрастания магнитной активности с 09:40 до 16:15 UT, когда SME-индекс превышал 1000 нТл.

Спутником DMSF F14 узкие провалы в N_i и высокие горизонтальные скорости дрейфа ионов (поляризационные джеты) 26 августа 1998 г. наблюдались 12 ч, с $\sim 10:40$ до $\sim 22:40$ UT включительно (горизонтальный отрезок на рис. 5).

В это время по данным магнитной обсерватории «Якутск» (YAK) наблюдались положительные бухты величиной ~ 50 – 100 нТл в H -компоненте и ~ 100 – 200 нТл в Z -компоненте магнитного поля Земли.

Ранее в наших работах [Халипов и др., 2001, 2016] проводилось сопоставление регистрации ПД

на ст. «Якутск» с резким ростом (>500 нТл) геомагнитного индекса AE . Было показано, что запаздывание появления ПД относительно скачка AE -индекса минимально в случаях, когда при суббуревых событиях станция наблюдения находилась вблизи местной магнитной полуночи. При этом во многих случаях эти события приходились на взрывную фазу суббури.

В данной работе нами рассматриваются события, когда одновременно наблюдались признаки ПД на ст. «Якутск» и на спутниках DMSP, а в качестве характеристики авроральной активности используется индекс SME . В период с 2010 по 2015 г. было обнаружено 13 таких событий в вечернем секторе MLT. На рис. 6 для этих событий приведены вариации SME -индекса, обобщенные методом наложенных эпох. За 0 ч принят момент регистрации ПД (F3s-отражения) на ст. «Якутск» [Степанов и др., 2017]. Одновременность наблюдения варьирует в пределах 30 мин до и после регистрации признака ПД на ст. «Якутск». Видно, что моменту регистрации ПД на ионосферной станции предшествует пик геомагнитной активности с максимумом $SME=1000$ – 1050 нТл за примерно 1.5 ч до наступления события на меридиане Якутска.

Таким образом, анализ вариаций SME -индекса показал, что появление максимального значения индекса около 1000 нТл опережало начало регистрации ПД на ст. «Якутск» в вечернем секторе MLT на 1.5 ч (см. рис. 6).

Следовательно, можно констатировать тот факт, что регистрация ПД на ст. «Якутск» происходила в период усиления суббуревой активности в основном на главной фазе большой магнитной бури.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследованию ПД и SAID посвящено достаточно много работ. Временная продолжительность ПД, или время наблюдения ПД, упоминается в монографии [Степанов и др., 2017]. Узкий провал ионизации был зарегистрирован над ст. «Тикси» в 09:15 UT 07.10.1981 (см. рис. 1.13 из [Степанов и др., 2017]). С 09:15 до 11:15 UT 07.10.1981 узкий провал ионизации сместился с широты ст. «Тикси» ($InvLat=65^\circ$) к широте ст. «Жиганск» ($InvLat=60^\circ$). Это смещение авторы связывали с ростом интенсивности геомагнитных возмущений. В 12:30 UT узкий провал далее сместился в сторону экватора и располагался между Жиганском и Якутском. Таким образом, 07.10.1981 почти непрерывное наблюдение ПД на ионосферных станциях Якутской цепочки продолжалось более трех часов. Заметим, что все ионосферные станции работали в патрульном режиме, т. е. зондирование проводилось через каждые 15 мин.

Из многочисленных серий наземных измерений такого рода следует, что характерное время существования узкого провала ионизации и высоких горизонтальных скоростей дрейфа ионов составляет несколько часов (~ 2 – 4 ч), в течение которых положение провала может заметно смещаться по широте, причем практически всегда в экваториальном направлении.

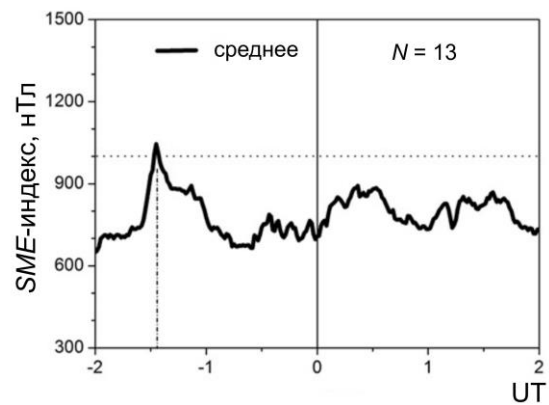


Рис. 6. Вариации SME -индекса для 13 событий, полученные методом наложенных эпох: 0 — время регистрации ПД в Якутске

Как показывает статистический анализ данных спутника Dynamics Explorer 2 (DE-2) за 1.5 года [Anderson et al., 1991], время существования SAID варьирует от 30 мин до 3 ч. Кроме того, SAID наблюдались после значительного роста AE -индекса, т. е. связаны с развитием суббуревой активности [Халипов и др., 2001, 2016; Степанов и др., 2008].

В работе [Синевич и др., 2021] выполнено исследование мелкомасштабной структуры ПД в субавроральной области во время умеренной ($Dst_{min}=-69$ нТл) магнитной бури 20 апреля 2018 г. Авторы представили результаты измерений параметров плазмы внутри ПД с 10:00 до 21:00 UT с помощью зондов Ленгмюра, установленных на микроспутнике NorSat-1. Основываясь на значениях SME , в максимуме достигавших 1400 нТл, можно предположить, что время существования ПД составляет 11 ч, однако пролеты микроспутника NorSat-1 происходили на фазе восстановления умеренной магнитной бури.

Два рассмотренных выше случая развития ПД произошли при повышенных значениях SME на главных фазах очень сильной (20–23 октября 1989 г.) и сильной (26–28 августа 1998 г.) магнитных бурь. Экстремальные значения интенсивности кольцевого тока и, следовательно, многочисленные повторяющиеся вспышки суббуревой активности обусловили длительную (7 и 12 ч) регистрацию ПД по спутниковым данным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Совместный анализ одновременных спутниковых и наземных наблюдений поляризованного джета/SAID во время сильных геомагнитных бурь показал, что узкие провалы ионизации и высокие горизонтальные скорости дрейфа ионов в субавроральной ионосфере могут наблюдаться 12 ч. Формирование поляризованного джета на главной фазе магнитной бури и длительное его наблюдение обусловлены экстремальной интенсивностью кольцевого тока во время сильных возмущений магнитного поля.

Многолетние данные как наземной цепочки ионосферных и магнитометрических станций, так и спутников DMSP показали, что регистрация поляризованного джета на ст. «Якутск» в вечернем сек-

торе начинается на ~ 1.5 ч позже резких вариаций *SME*-индекса.

Работа выполнена в рамках государственного задания (проект 0297-2021-0009, номер госрегистрации № 122011700182-1) и частично поддержана грантом РФФИ № 21-55-50013.

Авторы благодарят Национальный геофизический центр данных NOAA/NESDIS за предоставление данных спутников F8 – F19 DMSP IDM, SSJ/4 и SSM.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Айзенберг Г.З. Коротковолновые антенны. М.: Связь-издат, 1962. 815 с.

Бороев Р.Н., Васильев М.С. Исследование авроральной активности по данным *SME*-индекса на главных фазах магнитных бурь во время CIR- и ICME-событий. *Солнечно-земная физика*. 2021. Т. 7, № 4. С. 19–24. DOI: [10.12737/szf-74202103](https://doi.org/10.12737/szf-74202103).

Васильев Г.В., Васильев К.Н., Гончаров Л.П. Автоматическая панорамная ионосферная станция типа АИС. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 1961. Т. 1, № 11. С. 120–125.

Гальперин Ю.И., Пономарев В.Н., Зосимова А.Г. Прямые измерения скорости дрейфа ионов в верхней ионосфере во время магнитной бури П. Результаты измерений во время магнитной бури 3 ноября 1967 г. *Космические исследования*. 1973. Т. 11, № 2. С. 284–296.

Гальперин Ю.И., Сивцева Л.Д., Филиппов В.М., Халипов В.Л. Субавроральная верхняя ионосфера. Новосибирск: Наука, 1990. 192 с.

Магнитные бури за 1988–2000 гг. / Под ред. Канониди Х.Д. ИЗМИРАН, 2005. 277 с.

Мамруков А.П., Филиппов Л.Д. Якутская меридиональная цепочка ионозондов ВЗ и ВНЗ и круглосуточные наблюдения на ней главного ионосферного провала. Эффекты высыпания заряженных частиц в верхней атмосфере. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1988. С. 107–123.

Синевич А.А., Чернышов А.А., Чугунин Д.В. и др. Исследование мелкомасштабной структуры поляризационного джета во время геомагнитной бури 20 апреля 2018 г. *Солнечно-земная физика*. 2021. Т. 7, № 1. С. 21–33. DOI: [10.12737/szf-71202103](https://doi.org/10.12737/szf-71202103).

Степанов А.Е., Халипов В.Л., Бондарь Е.Д. Сопоставление характеристик поляризационного джета на разнесенных станциях Якутск – Подкаменная Тунгуска. *Космические исследования*. 2008. Т. 46, № 2. С. 116–121.

Степанов А.Е., Халипов В.Л., Котова Г.А. и др. Данные наблюдений крупномасштабной конвекции плазмы в магнитосфере в зависимости от уровня геомагнитной активности. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2016. Т. 56, № 2. С. 194–199. DOI: [10.7868/S0016794016010119](https://doi.org/10.7868/S0016794016010119).

Степанов А.Е., Халипов В.Л., Голиков И.А. и др. Поляризационный джет: узкие и быстрые дрейфы субавроральной ионосферной плазмы. Якутск: Издат. дом СВФУ. 2017. 176 с.

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. DOI: [10.12737/szf-54201908](https://doi.org/10.12737/szf-54201908).

Халипов В.Л., Гальперин Ю.И., Лисаков Ю.В. и др. Диффузная авроральная зона. II. Формирование и динамика полярного края субаврорального ионосферного провала в вечернем секторе. *Космические исследования*. 1977. Т. 15, № 5. С. 708–724.

Халипов В.Л., Гальперин Ю.И., Степанов А.Е., Шестакова Л.В. Формирование поляризационного джета в ходе взрывной фазы суббури: результаты наземных измерений. *Космические исследования*. 2001. Т. 39, № 3. С. 244–253.

Халипов В.Л., Степанов А.Е., Котова Г.А., Бондарь Е.Д. Вариации положения поляризационного джета и границы инжекции энергичных ионов во время суббури. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2016. Т. 56, № 2. С. 187–193. DOI: [10.7868/S0016794016020085](https://doi.org/10.7868/S0016794016020085).

Anderson P., Heelis R., Hanson W. The ionospheric signatures of rapid subauroral ion drifts. *J. Geophys. Res.* 1991. Vol. 96, no. A4. P. 5785–5792. DOI: [10.1029/90JA02651](https://doi.org/10.1029/90JA02651).

Foster J.C., Burke W.J. SAPS: A new characterization for sub-auroral electric fields. *Eos*. 2002. Vol. 83. P. 393–394.

Gjerloev J.W. A global ground-based magnetometer initiative. *Eos*. 2009. Vol. 90. P. 230–231. DOI: [10.1029/2009EO270002](https://doi.org/10.1029/2009EO270002).

Gjerloev J.W. The SuperMAG data processing technique. *J. Geophys. Res.* 2012. Vol. 117, A09213. DOI: [10.1029/2012JA017683](https://doi.org/10.1029/2012JA017683).

He F., Zhang X.-X., Chen B. Solar cycle, seasonal, and diurnal variations of subauroral ion drifts: Statistical results. *J. Geophys. Res.* 2014. Vol. 119, no. A6. P. 5076–5086. DOI: [10.1002/2014JA019807](https://doi.org/10.1002/2014JA019807).

Lario D., Decker R.B. The energetic storm particle event of October 20, 1989. *Geophys. Res. Lett.* 2002. Vol. 29, no. 10. P. 1393–1396. DOI: [10.1029/2001GL014017](https://doi.org/10.1029/2001GL014017).

MacDonald E.A., Donovan E., Nishimura Y., et al. New science in plain sight: Citizen scientists lead to the discovery of optical structure in the upper atmosphere. *Sci. Adv.* 2018. Vol. 4, iss. 3. eaaq00302018. DOI: [10.1126/sciadv.aaq0030](https://doi.org/10.1126/sciadv.aaq0030)

Newell P.T., Gjerloev J.W. Substorm and magnetosphere characteristic scales inferred from the SuperMAG auroral electrojet indices. *J. Geophys. Res.* 2011. Vol. 116. A12232. DOI: [10.1029/2011JA016936](https://doi.org/10.1029/2011JA016936).

Newell P.T., Gjerloev J.W. Local geomagnetic indices and the prediction of auroral power. *J. Geophys. Res.* 2014. Vol. 119. P. 9790–9803. DOI: [10.1002/2014JA020524](https://doi.org/10.1002/2014JA020524).

Reinisch B.W. New techniques in ground-based ionospheric sounding and studies. *Radio Sci.* 1987. Vol. 21, no. 3. P. 331–341. DOI: [10.1029/RS021i003p00331](https://doi.org/10.1029/RS021i003p00331).

Reinisch B.W., Haines D.M., Kuklinski W.S. The new portable digisonde for vertical and oblique sounding. *AGARD Conf. Proc.* 1992. CP 502. P. 1–11.

Spiro R.W., Heelis R.A., Hanson W.D. Rapid subauroral ion drifts observed by Atmospheric Explorer C. *Geophys. Res. Lett.* 1979. Vol. 5. P. 660–675.

URL: <https://dmsp.bc.edu> (дата обращения 20 апреля 2023 г.).

URL: <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/kp/index.html> (дата обращения 11 мая 2023 г.).

URL: <http://supermag.jhuapl.edu/info> (дата обращения 23 октября 2023 г.).

URL: <https://dmsp.bc.edu/html2/ssiesgeneral.html> (дата обращения 4 апреля 2024 г.).

URL: <https://dmsp.bc.edu/html2/ssiesdriftcartoon.gif> (дата обращения 4 апреля 2024 г.).

Как цитировать эту статью:

Степанов А.Е., Данилов С.И., Баишев Д.Г., Халипов В.Л., Котова Г.А., Кобякова С.Е. Время жизни поляризационного джета при длительных магнитных бурях. *Солнечно-земная физика*. 2024. Т. 10, № 2. С. 53–59. DOI: [10.12737/szf-102202405](https://doi.org/10.12737/szf-102202405).