

УДК 550.388.2

ОДНОВРЕМЕННЫЕ НАЗЕМНЫЕ И СПУТНИКОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ДЖЕТА НА МЕРИДИАНЕ СТАНЦИИ ЯКУТСК

© 2023 г. А. Е. Степанов¹ *, В. Л. Халипов², С. Е. Кобякова¹, С. И. Данилов¹¹Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера ЯНЦ СО РАН, Якутск, Россия²Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

*a_e_stepanov@ikfia.ysn.ru

Поступила в редакцию 14.07.2022 г.

После доработки 12.01.2023 г.

Принята к публикации 01.02.2023 г.

Приводятся данные одновременных измерений поляризационного джета с наземной станции вертикального радиозондирования Якутск и спутниковых наблюдений узких провалов электронной плотности или быстрых дрейфов ионосферной плазмы на запад со спутников серии *DMSP* (англ. Defense Meteorological Satellite Program). События основаны на наземных ионосферных измерениях и охватывают интервал времени с марта 1989 по декабрь 2015 г., т.е. около 26 лет. Одновременность наблюдений обеспечивается периодом времени примерно ± 1.5 ч от времени регистрации признаков поляризационного джета по данным наземной станции ионосферного зондирования или периодом обращения спутников *DMSP* вокруг Земли. По данным многолетних одновременных спутниковых и наземных измерений (126 событий) показано и подтверждено, что наличие на ионограммах характерных дополнительных следов отражений указывает на присутствие вблизи зенита станции наблюдения узких и быстрых дрейфов ионосферной плазмы или поляризационного джета. Также показано, что квазимгновенная долготная протяженность поляризационного джета на субавроральных широтах в отдельных случаях может достигать 8 ч или 120° по долготе.

DOI: 10.31857/S0023420622600210, EDN: ULGUXU

ВВЕДЕНИЕ

Поляризационный джет или узкие струи (потoki) быстрых ионных дрейфов к западу вблизи проекции плазмопаузы на высотах области F ионосферы являются одним из характерных признаков геомагнитного возмущения в субавроральной области F ионосферы. Они наиболее заметно проявляются во время суббурь на фоне крупномасштабной конвекции плазмы и впервые были обнаружены по данным советского спутника “Космос-184” [1]. Ввиду условий вмороженности плазмы такая узкая полоса быстрого западного дрейфа на высотах области F ионосферы была отождествлена с развитием направленного к полюсу локального электрического поля на экваториальной границе зоны крупномасштабной конвекции, которое регистрируется спутниками в том же пространственно-временном секторе. Скорость плазмы в полосе поляризационного джета может достигать на высотах области F сверхзвуковых значений — до нескольких километров в секунду.

Изучению поляризационного джета и SAID (англ. Subauroral Ion Drifts — обозначение, принятое в англоязычных странах) посвящено доста-

точно много работ. Он исследовался по спутниковым измерениям электрических полей в ионосфере и магнитосфере, измерениям дрейфа ионов в ионосфере, по наземным радарным измерениям, ионограммам вертикального и возвратно-наклонного зондирования ионосферы [2–11].

Единичные и статистические исследования поляризационного джета показывают, что обычно он имеет широтную протяженность 100–200 км или 1° – 2° по широте, наблюдается преимущественно в предполуденном секторе (19.00–24.00) MLT и на инвариантных широтах 55° – 65° ; максимальная скорость дрейфа плазмы в полосе поляризационного джета может достигать 4–5 км/с. Поляризационный джет всегда наблюдается экваториальнее границы высыпания авроральных электронов и с увеличением геомагнитной активности смещается к более низким широтам.

Формирование и существование поляризационного джета приводит к целому ряду резких структурных изменений в ионосфере, таких как изменения состава ионосферы, появление плазменных неоднородностей и формирование глубокого провала на высоте F -слоя ионосферы, широтно-ограниченные термосферные ветры, очень быстрые продольные вертикальные потоки, плаз-

мосферные провалы внутри и вне плазмопаузы, плазмосферное короткое замыкание суббуревых инъекций и тому подобное [12–19]. Все это оказывает влияние на условия распространения коротких радиоволн и отражает изменение космической погоды.

Одновременные ионозондовые измерения на Якутской цепочке ионосферных станций и единичные спутниковые измерения на космических аппаратах “Космос-184”, АЕ-С, DE-1, -2 и “Ореол-3” позволили выявить наземные признаки поляризации джета. Было установлено, что присутствие характерных следов отражений $F3s$ на ионограммах вертикального и возвратно-наклонного зондирования ионосферы свидетельствует о существовании вблизи зенита станции наблюдения поляризованного джета [20–22].

Следует отметить, что наземные ионозондовые измерения поляризованного джета проводятся только группой ионосферных исследований на базе Якутской меридиональной цепочки станций вертикального и возвратно-наклонного зондирования. Упомянем также, что в 1982–1986 гг. радиофизические измерения проводились со шведско-британских наземных УКВ радаров [23, 24], где наблюдались события подобные поляризованному джету.

В современных экспериментальных геофизических исследованиях при изучении субавроральных явлений важное значение имеют результаты многолетних наземных измерений параметров субавроральных и авроральных явлений. В архивах данных ионозондовых измерений на сети якутских станций содержится информация об уникальных событиях за последние пять циклов солнечной активности. Нередко ионозондовые измерения перекрываются со спутниковыми измерениями тепловой плазмы в ионосфере и плазмосфере, электрических полей и токов, энергичных ионов и электронов. Ионозондовые измерения проводятся в круглосуточном режиме каждые 15 мин и позволяют отслеживать физические процессы до и после возникновения какого-то явления. С появлением в ионосферных измерениях ионозондов с цифровым форматом представления данных реализовалась возможность работы станций в on-line режиме. Появляется прямая возможность обеспечивать различные геофизические службы оперативной информацией. В частности, одна из актуальных и важных задач — возможность мониторинга крупномасштабных структур субавроральной ионосферы, в первую очередь широты границы диффузных вторжений [25], рассматриваемой как наглядный и эффективный индекс геофизической активности, имеющий ясный физический смысл.

Целью настоящей работы является исследование многолетних одновременных измерений по-

ляризованного джета с наземной ионосферной станции Якутск и наблюдений быстрых ионных дрейфов со спутников серии *DMSP*.

ДАнные ИЗМЕРЕНИЙ

Для сопоставления наземных и спутниковых измерений было рассмотрено 126 событий поляризованного джета, зарегистрированных с наземной ионосферной станции Якутск, расположенной вблизи 130-го географического меридиана в восточной Сибири на широте 62.2° , и 281 измерение быстрых субавроральных дрейфов ионов со спутников серии *DMSP*. Программа *DMSP* (Defence Meteorological Satellite Program) — это программа долговременного спутникового мониторинга Земли, поставляющая оперативную глобальную информацию, в том числе и солнечно-геофизического характера. Интервал времени синхронных наземных и спутниковых наблюдений охватывает период с марта 1989 по декабрь 2015 г., т.е. около 26 лет.

Критерии отбора событий для сопоставления были следующие: для наземных данных — наличие на ионограммах станции зондирования характерных следов отражений $F3s$ [20] и резких срывов критической частоты на суточных f -графиках станции [26]; для спутниковых данных — пик горизонтальной скорости превышает или равен около 1000 м/с; полуширина — менее 3° ; событие расположено экваториальнее авроральной зоны в раннем-вечернем и вечернем секторах MLT; полярная кромка западных ионных дрейфов совпадает или примыкает к экваториальной границе потоков высыпающихся электронов [27].

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для сопоставлений одновременных наземных и спутниковых измерений выбирались пролеты и наблюдения спутников *DMSP*, входящие (пролетающие) в промежуток времени ± 1.5 ч от события регистрации признаков поляризованного джета на ионограммах вертикального зондирования [28], так как ионосфера не может мгновенно реагировать на изменения ионосферно-магнитосферных параметров.

В ходе работы было проанализировано 126 дней, когда на ионограммах ст. Якутск регистрировались отражения от поляризованного джета ($F3s$ -отражения), и 281 пролет спутников серии *DMSP*, когда спутники одновременно регистрировали большие горизонтальные скорости V_{horz} и резкие падения ионной плотности N_i .

Высота пролета спутников составляла от 790 до 856 км, а траектории спутников проходили в основном в раннем-вечернем и вечернем секторах MLT. Величина геомагнитной возмущенно-

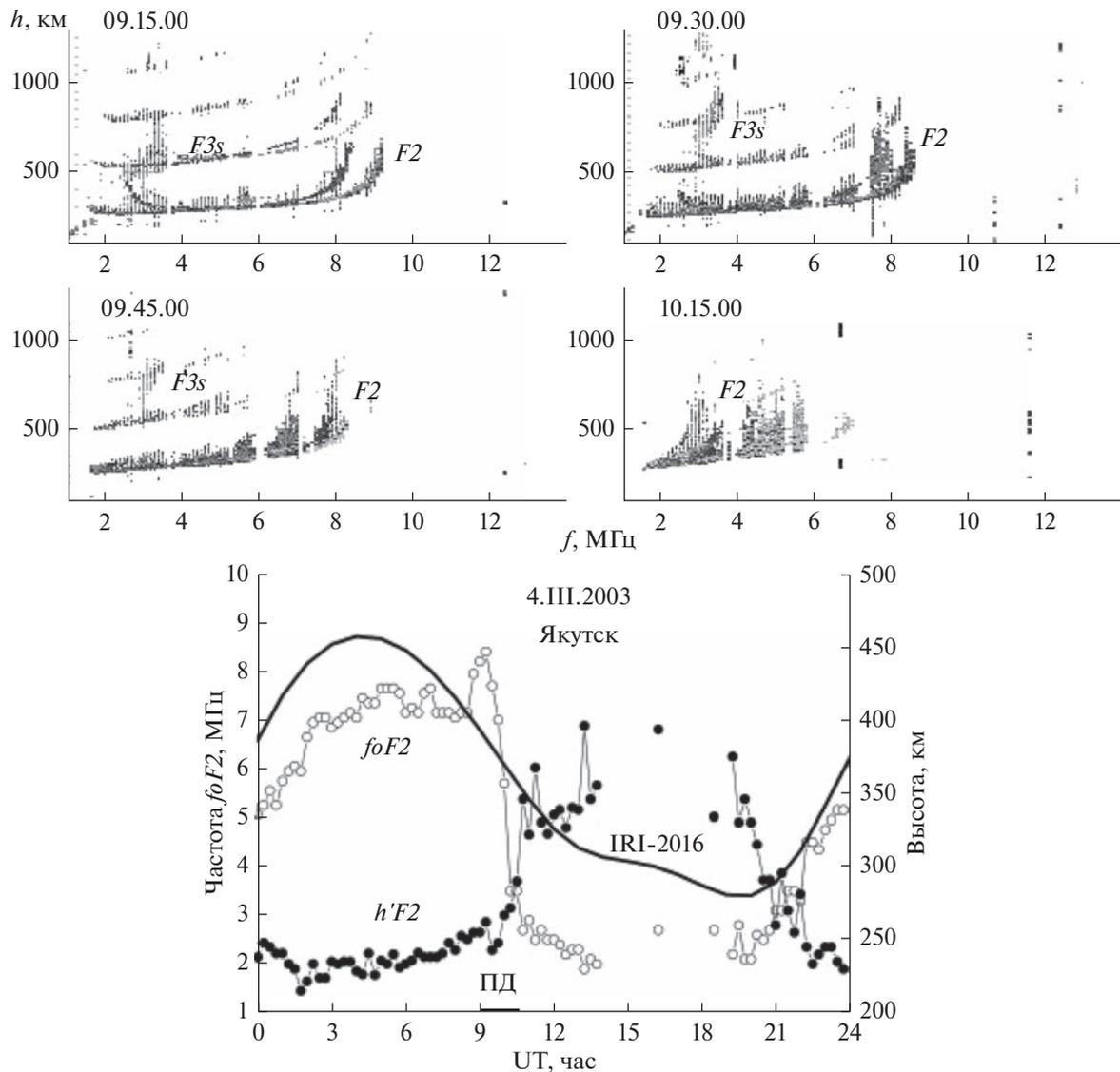


Рис. 1. Последовательность ионограмм вертикального зондирования (вверху) и f -график (внизу) наземной станции Якутск от 4 марта 2003 г. при пролете спутника *DMSP F15* вблизи меридиана станции наблюдения. Присутствие характерных следов $F3s$ на ионограммах, а также резкое падение критической частоты $foF2$ (белые кружки) и рост минимальной высоты отражений $h'F2$ (черные кружки) указывает на присутствие вблизи станции поляризационного джета. Жирной линией здесь приведен суточный ход критической частоты по модели IRI-2016.

сти по планетарному индексу Kp во всех событиях была больше или равна трем.

На рис. 1 приведены ионограммы и f -график станции Якутск от 4 марта 2003 г., когда вблизи меридиана станции пролетал спутник *DMSP F15*. В верхней части рисунка показаны ионограммы вертикального зондирования ионосферы. Видно, что в наземных данных с 09.15 до 10.15 UT (18.15–19.15 LT) на ионограммах начинает регистрироваться присутствие вблизи станции поляризационного джета — на ионограммах видны характерные следы $F3s$ -отражений от узкого провала ионизации. Характерные дополнительные следы отражений на ионограммах обозначены как $F3s$. В нижней части

рисунка приведен суточный ход критической частоты и минимальной высоты слоя $F2$ над Якутском, отмеченных белыми и черными кружочками соответственно. Заметно, что критическая частота в период между 08.30 и 10.30 UT начинает повышаться и резко падать, что говорит о возникновении или присутствии поляризационного джета вблизи зенита станции наблюдения [21, 25, 27]. Минимальная высота F -слоя во время возникновения поляризационного джета резко увеличивается с 250 до 350 км [29]. Период наблюдения дополнительных следов отражений на ионограммах отмечен жирной черточкой с надписью ПД на шкале мирового времени UT. Отметим, что

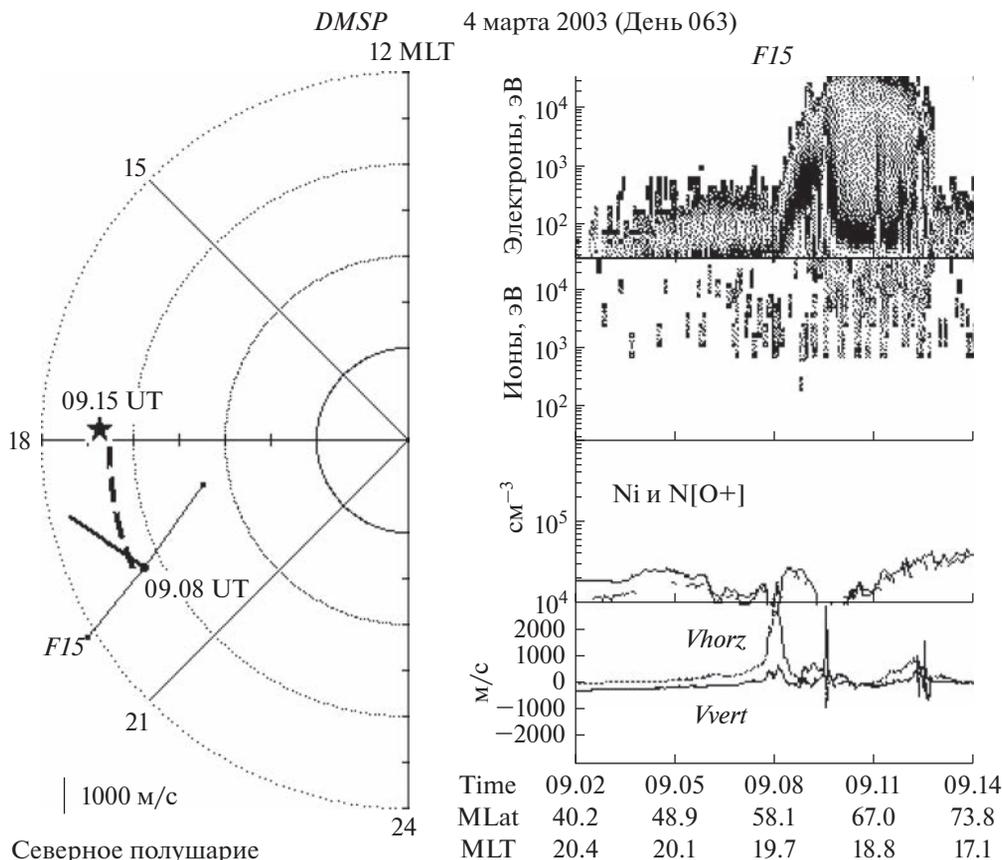


Рис. 2. Измерения поляризационного джета со спутника DMSP F15 при пролете вблизи меридиана станции Якутск 4 марта 2003 г. Траектория спутника и местоположение ст. Якутск (звездочка), в координатах магнитная широта—магнитное время, приведены слева. Масштаб скорости приведен внизу с левой стороны. На правой стороне рисунка показаны спектрограмма ионных и электронных высыпаний, профили Ni и N[O+] и горизонтальные и вертикальные скорости ионов (V_{horz} и V_{vert}) на высоте пролета спутника. Здесь тонкой прямой линией показано положение поляризационного джета со значением скорости дрейфа около 3 км/с.

после регистрации дополнительных отражений на ионограммах зондирующей станции в большинстве случаев наблюдаются ионосферные условия А и В — экранировка и поглощение радиоволн зондирующей станции [30]. Жирной линией здесь приведен суточный ход критической частоты по модели IRI-2016. Местное время в Якутске соотносится с мировым временем как $LT = UT + 9$ ч.

Спутник DMSP F15 в это время пролетал восточнее станции Якутск. Траектория спутника и местоположение ст. Якутск, в координатах магнитная широта — магнитное время, приведены на рис. 2. На полярной диаграмме положение ст. Якутск, где регистрируются ионосферные признаки поляризационного джета, отмечено темной звездочкой. На траектории спутника в 09.08 UT утолщенной линией отмечено западное движение ионосферной плазмы со скоростью около 3000 м/с. На правой стороне рисунка показаны спектрограммы ионных и электронных высыпаний, профили плотностей Ni и N[O+] и го-

ризонтальные и вертикальные скорости ионов (V_{horz} и V_{vert}) на высоте пролета спутника.

Из рисунка видно, что экваториальнее электронных высыпаний наблюдается понижение плотности ионной составляющей и резкий рост скорости V_{horz} почти до 3000 м/с. Такие вариации параметров четко указывают на существование в ионосфере поляризационного джета. На рисунке положение поляризационного джета отмечено вертикальной линией на траектории спутника F15, где длина линии примерно соответствует скорости дрейфа плазмы.

Таким образом, возникновение или существование в субавроральной ионосфере поляризационного джета или узких провалов ионизации можно проследить и с наземных, и со спутниковых измерений, что показывают одновременные измерения от 4 марта 2003 г.

Примеры квазисовременных наблюдений поляризационного джета с наземных и спутниковых (спутники DMSP F08—F19) измерений за различные интервалы времени приведены на рис. 3.

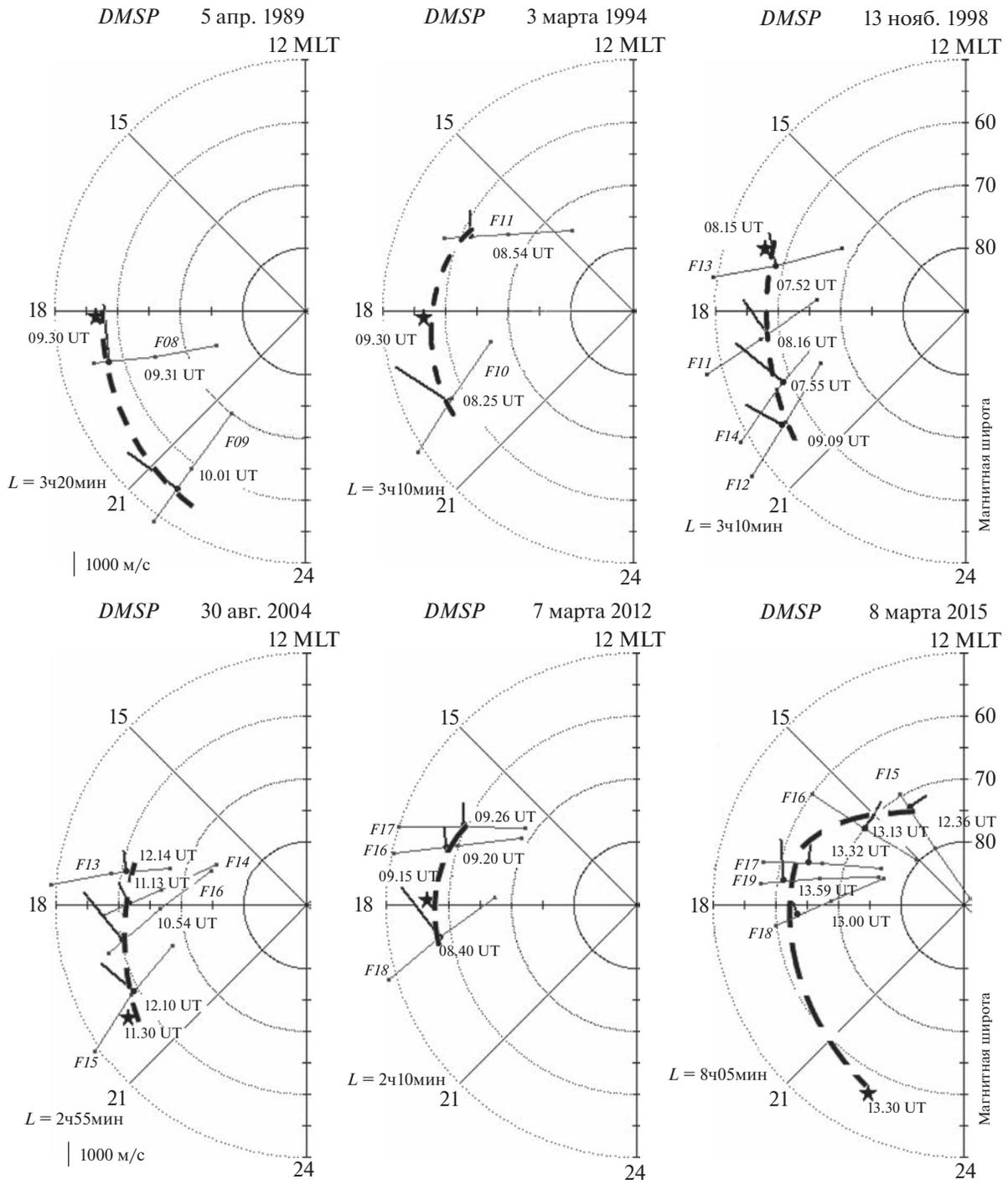


Рис. 3. Квазисовременные многоспутниковые измерения поляризационного джета со спутников серии *DMSP* и с наземной ионосферной станции Якутск. Здесь, тонкие прямые – траектории пролетов спутников *DMSP*, где время между точками пролета спутника составляет 3 мин. На траектории спутника утолщенными прямыми отмечены максимальные значения горизонтальных скоростей поляризационного джета в западном направлении. Толстые штриховые линии обозначают примерное положение узкой струи ионосферной плазмы на высотах спутника, направленное на запад. Буква *L* обозначает кажущуюся протяженность поляризационного джета в часах.

Здесь, как указывалось выше, местоположение наземной станции Якутск отмечено звездочкой. Тонкие прямые – траектории пролетов спутников *DMSP*, пересекающие область больших скоростей, где время между точками пролета

спутника составляет 3 мин. На траектории спутника утолщенными прямыми отмечены максимальными горизонтальными скоростями поляризационного джета в западном направлении. Толстые штриховые линии обозначают примерное поло-

Таблица 1

Год	Количество событий	Спутники <i>DMSP</i>	Год	Количество событий	Спутники <i>DMSP</i>
1989	7	<i>F8, F9</i>	2003	9	<i>F13, F14, F15</i>
1990	10	<i>F8, F9</i>	2004	1	<i>F13, F14, F15, F16</i>
1991	19	<i>F10</i>	2005	—	—
1992	7	<i>F10, F11</i>	2006	—	—
1993	6	<i>F8, F10, F11</i>	2007	4	<i>F15, F16, F17</i>
1994	4	<i>F10, F11</i>	2008	—	—
1995	4	<i>F11, F12</i>	2009	—	—
1996	2	<i>F11, F12</i>	2010	1	<i>F15, F16</i>
1997	—	—	2011	1	<i>F15, F16, F17</i>
1998	9	<i>F12, F13, F14</i>	2012	6	<i>F16, F17, F18</i>
1999	8	<i>F12, F13, F14</i>	2013	4	<i>F17, F18</i>
2000	13	<i>F12, F13, F14, F15</i>	2014	—	—
2001	7	<i>F12, F13, F14, F15</i>	2015	2	<i>F17, F19</i>
2002	2	<i>F13, F14, F15</i>		Всего 126	Всего 281 пролет

жение узкой струи ионосферной плазмы на ионосферных высотах, направленное на запад. Долготная протяженность в часах, между регистрацией поляризационного джета наземной станцией Якутск и моментом измерения максимальной западной скорости, обозначенная буквой *L*, а также масштаб ионной скорости приведены внизу с левой стороны полярных диаграмм. Наибольшая квазипротяженность *L* поляризационного джета (8 марта 2015 г.) составляет около 8 ч или 120°; таких событий было три случая. Отметим, что все эти протяженные события встречались ожидаемо тогда, когда станция наблюдения находилась в позднем вечернем секторе, т.е. после 21.00 MLT.

Во всех случаях видно, что местоположение поляризационного джета по данным наземной станции хорошо коррелирует с одновременными положениями узких дрейфов ионосферной плазмы по данным со спутников *DMSP*. На рисунке мы постарались привести пролеты и измерения всех сменяющих друг друга спутников с 1989 по 2015 гг.

В табл. 1 приведена статистика одновременных измерений, где первая колонка означает год рассмотрения, вторая — количество наземных событий в году, совпадающих по времени с измерениями со спутников *DMSP*, третья колонка — названия спутников, чьи данные использовались в рассмотрении. Заметим, что отсутствие или малое количество регистраций поляризационного джета по наземным данным встречается в годы минимума циклов солнечной активности.

Проведенный анализ одновременных измерений поляризационного джета показал, что в наземных и спутниковых измерениях наблюдается

один и тот же эффект на границе плазмопаузы, т.е. усиление электрического поля северного направления, которое приводит к узким и быстрым западным дрейфам ионосферной плазмы на субавроральных широтах [2–11]. На спутниковых данных *DMSP* они проявляются: 1) как резкий рост западной скорости, измеряемый дрейфметрами, 2) провал в ионной плотности и 3) потоком высыпавшихся мягкоэнергичных электронов и ионов полярнее узкого провала и роста скоростей.

По результатам одновременных измерений можно сделать вывод, что в области поляризационного джета или узкого провала ионизации не наблюдается высыпаний мягкоэнергичных частиц. Значительное высыпание мягкоэнергичных частиц наблюдается к северу от поляризационного джета, которое формирует полярную стенку главного ионосферного провала [9, 16].

Следует сказать, что одновременные измерения никак не говорят о мгновенной долготной протяженности поляризационного джета, так как и наземные, и спутниковые измерения регистрируют только часть исследуемого явления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены одновременные наземные и спутниковые измерения, когда на наземных ионограммах вертикального зондирования наблюдались признаки поляризационного джета. Было проанализировано 126 дней, когда на ионограммах ст. Якутск регистрировались отражения от поляризационного джета, и 281 пролет спутников серии *DMSP*, когда спутники регистрировали большие горизонтальные скорости V_{horz} и резкие

падения ионной плотности N_i экваториальнее высыпаний мягкоэнергичных частиц. Величина геомагнитной возмущенности K_p во всех событиях была больше или равна трем.

В исследовании получены следующие результаты:

– по данным многолетних одновременных спутниковых и наземных измерений (126 событий) показано и подтверждено, что наличие на ионограммах характерных дополнительных следов отражений указывает на присутствие вблизи зенита станции наблюдения узких и быстрых дрейфов ионосферной плазмы или поляризационного джета;

– показано, что долготная квазипротяженность поляризационного джета на субавроральных широтах в отдельных случаях может достигать 8 ч или 120° по долготе.

Работа выполнена в рамках государственного задания – номер государственной регистрации 122011700182-1. Авторы благодарят Национальный геофизический центр данных NOAA/NESDIS за предоставление данных спутников *F8–F19 DMSP IDM*, *SSJ/4* и *SSM*. Мы благодарны мировому центру данных по геомагнетизму в Киото (<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>) за предоставление данных по индексам геомагнитной активности. Авторы также выражают сердечную признательность сотрудникам ЛМИИ ИКФИА ЯНЦ СО РАН Л.Н. Габец, Н.Н. Павловой и А.О. Ершовой за нестандартную обработку ионосферных материалов Якутской цепочки ионосферных станций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гальперин Ю.И., Пономарев В.Н., Зосимова А.Г. Прямые измерения скорости дрейфа ионов в верхней ионосфере во время магнитной бури II. Результаты измерений во время магнитной бури 3 ноября 1967 г. // Косм. исслед. 1973. Т. 11. № 2. С. 284–296.
2. Spiro R.W., Heelis R.A., Hanson W.B. Rapid subauroral ion drifts observed by Atmospheric Explorer C // Geophys. Res. Lett. 1979. V. 6. Iss. 8. P. 657–660.
3. Maynard N.C., Aggson T.L., Heppner J.P. Magnetospheric observation of large subauroral electric fields // Geophys. Res. Lett. 1980. V. 7. Iss. 11. P. 881–884.
4. Rich F.J., Burke W.J., Kelley M.C., Smiddy M. Observations of field-aligned currents in association with strong convection electric fields at subauroral latitudes // J. Geophys. Res. 1980. V. 85. Iss. A5. P. 2335–2340.
5. Providakes J.F., Kelley M.K., Swartz W.E. et al. Radar and optical measurements of ionospheric processes associated with intense subauroral electric fields // J. Geophys. Res. 1989. V. 94. Iss. A5. P. 5350–5366.
6. Филиппов В.М., Решетников Д.Д., Халипов В.Л. и др. Комплексные наблюдения узких провалов ионизации в области F наземными и спутниковыми методами // Косм. исслед. 1989. Т. 27. № 4. С. 568–584.
7. Гальперин Ю.И., Сивцева Л.Д., Филиппов В.М., Халипов В.Л. Субавроральная верхняя ионосфера. Новосибирск: Наука, 1990. 192 с.
8. Karlsson T., Marklund G.T., Blomberg L.G., Malkki A. Subauroral electric fields observed by the Freja satellite: A statistical study // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. Iss. A3. P. 4327–4314.
9. Халипов В.Л., Гальперин Ю.И., Степанов А.Е., Шестакова Л.В. Формирование поляризационного джета в ходе взрывной фазы суббури: результаты наземных измерений // Косм. исслед. 2001. Т. 39. № 3. С. 244–253.
10. He F., Zhang X.-X., Chen B. Solar Cycle, Seasonal, and Diurnal Variations of Subauroral Ion Drifts: Statistical Results // J. Geophys. Res. 2014. V. 119. Iss. 6. P. 5076–5086. <https://doi.org/10.1002/2014JA019807>
11. Синевич А.А., Чернышев А.А., Чугунин Д.В. и др. Пространственная структура поляризационного джета по данным спутников Norsat-1 и Swarm // Косм. исслед. 2021. Т. 59. № 6. С. 489–497. <https://doi.org/10.31857/S0023420621060091>
12. Anderson P.C., Heelis R.A., Hanson W.B. The ionospheric signatures of rapid subauroral ion drifts // J. Geophys. Res. 1991. V. 96. Iss. A4. P. 5785–5792.
13. Karlsson T., Marklund G.T., Blomberg L.G., Malkki A. Subauroral electric fields observed by the Freja satellite: A statistical study // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. Iss. A3. P. 4327–4314.
14. Anderson P.C., Hanson W.B., Heelis R.A. et al. A proposed production model of rapid subauroral ion drifts and their relationship to substorm evolution // J. Geophys. Res. 1993. V. 98. Iss. A4. P. 6069–6078.
15. Anderson P.C., Heelis R.A., Hanson W.B. The ionospheric signatures of rapid subauroral ion drifts // J. Geophys. Res. 1991. V. 96. Iss. A4. P. 5785–5792.
16. Степанов А.Е., Халипов В.Л., Голиков И.А., Бондарь Е.Д. Поляризационный джет: узкие и быстрые дрейфы субавроральной ионосферной плазмы. Якутск: Издат. дом СВФУ, 2017. 176 с.
17. He F., Zhang X.-X., Chen B., Fok M.-C. Plasmaspheric trough evolution under different conditions of subauroral ion drift // Sci. China Tech. Sci. 2012. V. 55. Iss. 5. P. 1287–1294. <https://doi.org/10.1007/s11431-012-4781-1>
18. Mishin E.V., Puhl-Quinn P.A. SAID: Plasmaspheric short circuit of substorm injections // Geophys. Res. Lett. 2007. V. 34. L24101. <https://doi.org/10.1029/2007GL031925>
19. Mishin E.V., Streltsov A.V. Nonlinear wave and plasma structures in the auroral and subauroral geospace. Elsevier Science Publishing Co Inc., 2022. 621 p.
20. Шульгина Н.В. Спорадические образования в F -области // Авроральные явления 70-II. Апатиты: КФ АН СССР, 1974. С. 44–46.

21. Решетников Д.Д., Филиппов В.М., Баишев Д.Г. и др. Морфология и динамика узких провалов ионизации в субавроральной области F: препринт. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1987. 39 с.
22. Филиппов В.М., Решетников Д.Д., Халипов В.Л. и др. Комплексные наблюдения узких провалов ионизации в области F наземными и спутниковыми методами // Косм. исслед. 1989. Т. 27. № 4. С. 568–584.
23. Freeman M.P., Southwood D.J., Lester M., Yeoman T.K., Reeves G.D. Substorm-associated radar auroral surges // J. Geophys. Res. 1992. V. 97. Iss. A8. P. 12173–12185.
24. Shand B.A., Lester M., Yeoman T.K. Substorm associated radar auroral surges: a statistical study and possible generation model // Ann. Geophysicae. 1998. V. 16. P. 441–449.
25. 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 // Косм. исслед. 1977. Т. 15. № 5. С. 708–724.
26. 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. <https://doi.org/10.12737/szf-54201908>
27. He F., Zhang X.-X., Chen B. Solar cycle, seasonal, and diurnal variations of subauroral ion drifts: statistical results // J. Geophys. Res. 2014. V. 11. Iss. 6. P. 5076–5086. <https://doi.org/10.1002/2014JA019807>
28. Степанов А.Е., Гололобов А.Ю., Халипов В.Л., Голиков И.А. Вариации ионосферных параметров при формировании поляризационного джета // Геомагнетизм и аэрономия. 2021. Т. 61. № 1. С. 60–65. <https://doi.org/10.31857/S0016794021010156>
29. Степанов А.Е., Голиков И.А., Попов В.И., Бондарь Е.Д., Халипов В.Л. Структурные особенности субавроральной ионосферы при возникновении поляризационного джета // Геомагнетизм и аэрономия. 2011. Т. 51. № 5. С. 643–649.
30. Руководство URSI по интерпретации и обработке ионограмм / Под ред. Н.В. Медниковой. М.: Наука, 1977. 342 с.