

УДК 551.510.537

ВЛИЯНИЕ СУББУРЬ НА ПРОЦЕССЫ В ИОНОСФЕРЕ И ПЛАЗМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

© 2024 г. Г. А. Котова^{1, *}, В. Л. Халипов¹, А. Е. Степанов², В. В. Безруких¹¹ Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), Москва, Россия² Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера СО РАН (ИКФИА СО РАН), Якутск, Россия

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

Поступила в редакцию 15.09.2023 г.

После доработки 06.11.2023 г.

Принята к публикации 23.11.2023 г.

Во время магнитосферных суббурь в области F ионосферы и вплоть до высот ~1000 км формируется поляризационный джет. По измерениям энергичных ионов кольцевого тока на спутнике AMPTE/CSE и по данным дрейфметров на спутниках DMSP было показано, что формирование поляризационного джета связано с вторжением энергичных ионов (10–100 кэВ) во внутреннюю магнитосферу во время суббурь. В области развития поляризационного джета изменяются характеристики плазмы в ионосфере: плотность плазмы понижается, иногда на порядок величины, и одновременно существенно повышается температура плазмы. Кроме того, одновременно с дрейфом плазмы на запад обычно наблюдается и дрейф плазмы вверх. Поток ионов вверх из области развития поляризационного джета $\sim 10^9$ см⁻²с⁻¹ на порядок превосходит средний дневной поток ионов из ионосферы в плазмосферу. Измерения на спутнике МАГИОН-5 в плазмосфере на тех же L-оболочках, где регистрируется поляризационный джет в ионосфере, показывают возрастание концентрации холодных ионов. “Горбы” плотности, наблюдаемые вблизи плазмопаузы, по-видимому, образуются благодаря потокам плазмы из ионосферы, сопровождающих формирование поляризационного джета. Таким образом, последствия суббурь наблюдаются практически во всей магнитосфере.

DOI: 10.31857/S0016794024020043, EDN: DZKGKN

1. ВВЕДЕНИЕ

Представления о магнитосферных суббурях первоначально складывались из описания полярных сияний, и считалось, что это комплекс явлений, развивающихся в северной и южной полярных областях околоземного пространства. В начале спутниковой эры, после открытия геомагнитного хвоста Земли [Ness, 1965] было установлено, что суббури, связанные с взаимодействием возмущенных потоков солнечного ветра с магнитосферой Земли, начинаются процессами в хвосте магнитосферы и затрагивают области вблизи экваториальной плоскости вплоть до расстояний 3–5 радиусов Земли от ее центра [Галеев, 1979]. Развитие суббурь в хвосте магнитосферы приводит к инжекции энергичных ионов (20–50 кэВ) и усилению кольцевого тока около Земли [Stephens et al., 2019]. Радиальное электрическое поле, возникающее на границе инжекции, проецируется в ионосферу вдоль силовых линий магнитного поля. Таким образом, развитие суббурь охватывает не только полярные области

ионосферы и атмосферы, но и существенно влияет на субавроральную ионосферу [Деминов, 2008].

Поляризационный джет (ПД) — быстрый, до 3 км/с, дрейф ионов на запад на высотах области F в ионосфере — был открыт Ю.И. Гальпериным с коллегами по данным спутника “Космос-184” [Гальперин и др., 1973; Galperin et al., 1974]. Такой узкий по широте 1–2° — дрейф ионов должен быть связан с электрическим полем 100–130 мВ/м, направленным к полюсу. В англоязычной литературе для поляризационного джета чаще всего используется термин SAID (SubAuroral Ion Drifts — субавроральный ионный дрейф) [Spiro et al., 1979]. В 2002 г. Дж. Фостер с соавторами [Foster and Burke, 2002; Foster and Vo, 2002] по данным спутника DMSP F13 и радара некогерентного рассеяния Милстоун Хил описали более широкие дрейфовые потоки ионов (~5° и более) в ионосфере. Средняя пиковая скорость этих потоков составляла 0.9 км/с. Авторы назвали это явление SAPS (Subauroral Polarization Streams — субавроральный поляризационный

поток). Такой поток обычно не имеет резких границ по широте ни с экваториальной, ни с полярной стороны, тогда как поляризационный джет в большинстве случаев имеет резкую экваториальную границу. ПД считается частным случаем SAPS или областью SAPS вблизи пика западного компонента скорости [Landry and Anderson, 2018].

Открытие ПД по измерениям на спутниках способствовало тщательному анализу данных, получаемых на наземных ионосферных станциях. Было обнаружено, что дополнительные отражения F_3s на меньших частотах и на большей дальности, чем регулярные фоновые следы на ионограммах вертикального зондирования ионосферы, соответствуют узким быстрым потокам плазмы вблизи зенита станции наблюдения [см. Халипов и др., 2001; Степанов и др., 2017 и ссылки в них]. После появления таких отражений критические частоты фонового слоя F_2 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 [Степанов и др., 2016].

Данные наземных ионосферных станций дают обширный материал для исследования условий развития поляризационного джета в ионосфере и его связи с развитием суббурь в магнитосфере. Одновременные данные, полученные на спутнике МАГИОН-5 в плазмосфере, на наземных ионосферных станциях и на спутниках серии DMSP в ионосфере позволяют установить характерные изменения параметров тепловой плазмы и в ионосфере, и в плазмосфере, происходящие во время развития суббурь.

В настоящей работе рассмотрена взаимосвязь явлений, возникающих в магнитосфере, плазмосфере и ионосфере во время развития суббурь.

2. ФОРМИРОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ДЖЕТА ПРИ ИНЖЕКЦИИ ЭНЕРГИЧНЫХ ЧАСТИЦ В БЛИЖНЮЮ МАГНИТОСФЕРУ

В ряде работ, рассматривающих возможные механизмы формирования ПД в ионосфере, учитывалось электрическое поле, возникающее в магнитосфере во время суббурь вблизи полуночного меридиана при инъекции энергичных ионов плазменного слоя и приближении кольцевого тока к Земле [Smiddy et al., 1977; Southwood and Wolf, 1978]. Это электрическое поле проецируется в ионосферу вдоль магнитных силовых линий и приводит к возникновению западного дрейфа плазмы. Вблизи экваториальной плоскости энергичные ионы дрейфуют также на запад, и с течением времени в ионосфере ПД развивается и в вечернем секторе. Однако единого общепринятого

механизма, описывающего развитие поляризационного джета, до сих пор не выработано.

В работах В.Л. Халипова с соавторами [Khalipov et al., 2003; Халипов и др., 2016a] были представлены экспериментальные доказательства взаимосвязи формирования поляризационного джета на ионосферных высотах с процессом инъекции ионов с энергиями в несколько десятков килоэлектронвольт во внутреннюю магнитосферу во время суббурь. Вблизи области инъекции в околополуночном секторе магнитного локального времени на геостационарных спутниках наблюдаются ионы без дисперсии, а в вечернем секторе — с дисперсией в форме “носовых структур”. В статьях, указанных выше, рассматривались только случаи регистрации ПД и энергичных ионов в течение 3-х часов после изолированной вспышки AE (“<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html>” Geomagnetic Data Service (kyoto-u.ac.jp)), чтобы, с одной стороны, можно было легко связать эти явления с конкретной суббурей и, с другой стороны, избежать рассмотрения носовых структур, коротирующих с Землей.

На рис. 1 рассмотрен еще один пример, свидетельствующий о взаимосвязи формирования границы инъекции ионов и поляризационного

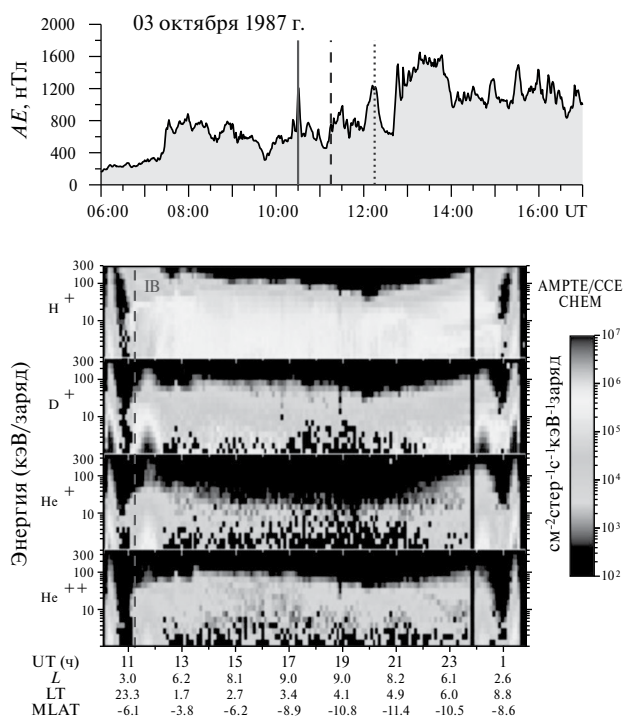


Рис. 1. Вверху: изменение индекса AE со временем. Сплошная линия — вспышка AE . Штриховая линия — время регистрации границы инъекции, точечная линия — время регистрации ПД на ст. Якутск. Внизу: спектрограммы “энергия — время” для различных ионов, зарегистрированных прибором CSEM на спутнике AMPTE/CCE 3–4 октября 1987 г. Штриховой линией отмечена граница инъекции ионов (IB).

джета в ионосфере. На этом рисунке показаны результаты измерения потоков ионов водорода, кислорода и гелия вблизи экваториальной плоскости магнитосферы Земли на спутнике AMPTE/CSE прибором CHEM 3—4 октября 1987 г. (http://sd-www.jhuapl.edu/AMPTE/summary_images/summary_image_files/), [Gloeckler et al., 1985]. Вдоль оси ординат показана энергия ионов в килоэлектрон-вольтах на единицу заряда, вдоль оси абсцисс — время UT, величина параметра Мак—Илвэйна L (расстояние от центра Земли до магнитной силовой линии на экваторе в радиусах Земли), местное время (LT) и магнитная широта (MLAT) места измерения. Вертикальной штриховой линией отмечена граница инжекции ионов во внутреннюю магнитосферу. Эта граница наблюдалась в 11:15 UT, 23.30 LT (местное время здесь и далее приведено в часах) на магнитной оболочке $L \approx 3.2$. На наземной ионосферной станции Якутск ($L = 3.0$) через час в 12:15 UT, 21.25 LT был зарегистрирован поляризационный джет. Известно, что на оболочке $L \approx 3$ за час ПД смещается на запад, то есть на более ранние часы местного времени, в среднем на 3 часа LT [Khalipov et al., 2003]. В случае, показанном на рис. 1, за час ПД мог переместиться на 2.05 LT и при этом опуститься на немного более низкую L -оболочку. И регистрация на глубокой L -оболочке границы инжекции ионов плазменного слоя, и наблюдение поляризационного джета в ионосфере связаны с развитием суббури. Изолированный всплеск AE -индекса (рис. 1, верхний график) произошел в 10:30 UT 3 октября 1987 г., за 45 мин до регистрации границы инжекции ионов в околополуденном секторе и за 1 ч 45 мин до формирования поляризационного джета над ст. Якутск в позднем вечернем секторе.

Следует отметить, что ионы плазменного слоя, инжектированные во внутреннюю магнитосферу, дрейфуют вокруг Земли, образуя кольцевой ток, и, таким образом, граница инжекции ионов одновременно является внутренней границей околоземного кольцевого тока.

В работе [Халипов и др., 2016а] на значительном статистическом материале было показано, что инвариантная широта (или параметр L Мак—Илвэйна) границы инжекции ионов с энергией около 50 кэВ зависит от индекса AE , характеризующего интенсивность суббури, и эта зависимость совпадает с зависимостью положения экваториальной границы ПД также от AE -индекса.

Рисунок 2 воспроизводит заключительный рисунок из указанной работы и демонстрирует совпадение зависимостей. Зависимость инвариантной широты (Λ_{eq}) экваториальной границы ПД от величины всплеска AE -индекса аппроксимируется линейной функцией, показанной сплошной линией на рис. 2:

$$\Lambda_{eq} = -0.0079AE + 64.0. \quad (1)$$

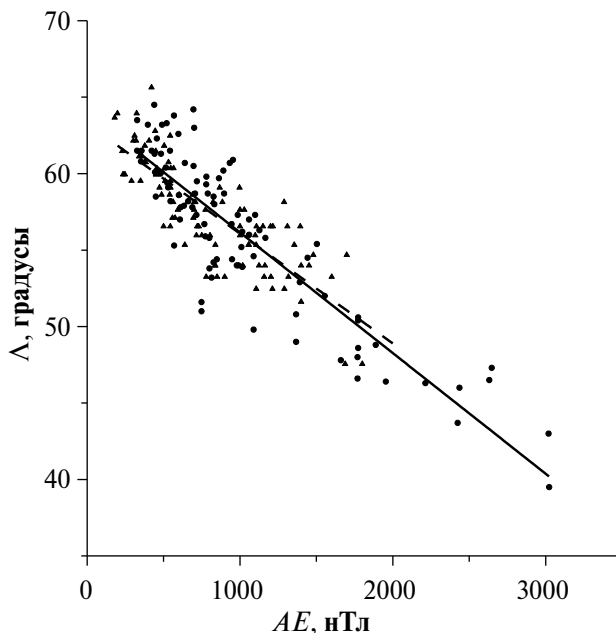


Рис. 2. Зависимость экваториальной границы ПД (точки) и внутренней границы кольцевого тока (треугольники) от величины всплеска суббуревой активности AE . Соответствующие аппроксимирующие линии, сплошная и пунктирная, описаны в тексте.

Пунктирной линией на рис. 2 показана линейная функция, аппроксимирующая зависимость инвариантной широты внутренней границы кольцевого тока (Λ_b) от величины всплеска AE :

$$\Lambda_b = -0.0072AE + 63.2. \quad (2)$$

Соотношения (1) и (2) очень близки, коэффициенты детерминации равны соответственно 0.79 и 0.68, и это свидетельствует об идентичности внутренней границы кольцевого тока (или границы инжекции энергичных ионов) и экваториальной границы ПД, их формирование происходит на одних и тех же L -оболочках в одно и то же локальное время, хотя и на разных геомагнитных широтах. Таким образом, было надежно установлено, что формирование ПД связано с вторжением энергичных ионов во внутреннюю магнитосферу во время суббури.

Кроме того, совпадение экваториальной границы ПД и границы инжекции ионов, а также, показанные на ряде примеров (см. рис. 1, [Khalipov et al., 2003, Халипов и др., 2016а]), почти одновременные наблюдения поляризационного джета и границы инжекции ионов в околополуденном секторе магнитосферы указывают на то, что электрическое поле, возникающее в магнитосфере, не успевает нейтрализоваться тепловой плазмой плазмосферы и очень быстро передается на ионосферные высоты.

3. ФОРМИРОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ДЖЕТА НА ВЗРЫВНОЙ ФАЗЕ СУББУРИ

Первоначальный анализ развития ПД в ионосфере по данным спутника DE-2 (Dynamics Explorer-2) показал, что минимальное время задержки возникновения ПД относительно начала вспышки AE -индекса составляет 30 мин и, таким образом, ПД появляется на восстановительной фазе суббури [Anderson et al., 1993]. Однако, подробный анализ данных наземных ионосферных станций в Якутске ($L = 3.0$, магнитное локальное время $MLT = UT + 9$) и Подкаменной Тунгуске ($L = 3.0$, $MLT = UT + 7$) [Халипов и др., 2001; Степанов и др., 2008] показал, что минимальная задержка возникновения ПД относительно начала развития суббури может составлять менее 10 мин (рис. 3). Такие события наблюдаются, когда в момент начала суббури станция находится вблизи полуночного меридиана. Это достаточно редко случается даже при непрерывных наблюдениях на наземных ионосферных станциях, тем более, такие совпадения места измерения и начала суббури трудно “поймать” при спутниковых наблюдениях.

На рис. 3 рассмотрены события, для которых время задержки появления ПД над станциями относительно начала вспышки суббури не превышает трех часов. Эмпирически было установлено, что на станциях Якутск и Подкаменная Тунгуска, которые находятся на магнитной оболочке $L \approx 3$, ПД обычно наблюдается при величине $AE \geq 500$ нТл. Поэтому рассматривались изолированные вспышки $AE \geq 500$ нТл. На рис. 3 указаны числа рассмотренных событий (N) и коэффициенты корреляции (R) аппроксимирующих прямых: $UT_{ПД} = 0.81UT_{AE} + 3.5$ для ст. Якутск и $UT_{ПД} = 0.82UT_{AE} + 3.7$ для ст. Подкаменная Тунгуска.

Зависимость времени возникновения ПД над станциями от времени начала вспышки суббури описывается практически совпадающими линейными функциями с высокими коэффициентами корреляции $R > 0.9$, что дополнительно свидетельствует о тесной связи возникновения ПД со вспышками суббуровой активности. Полученную эмпирическую зависимость можно использовать для оценки времени появления ПД после начала суббури. В среднем в околополуночном секторе ПД возникает на 30 минут позже начала вспышки AE , и это, более или менее, соответствует спутниковым данным [Anderson et al., 1993], однако число событий с меньшей задержкой значительно, и, следовательно, в ряде случаев ПД развивается на взрывной фазе суббури.

По-видимому, главным фактором возникновения ПД является проникновение энергичных ионов в ближнюю магнитосферу во время суббурь и именно со временем вторжения ионов связано

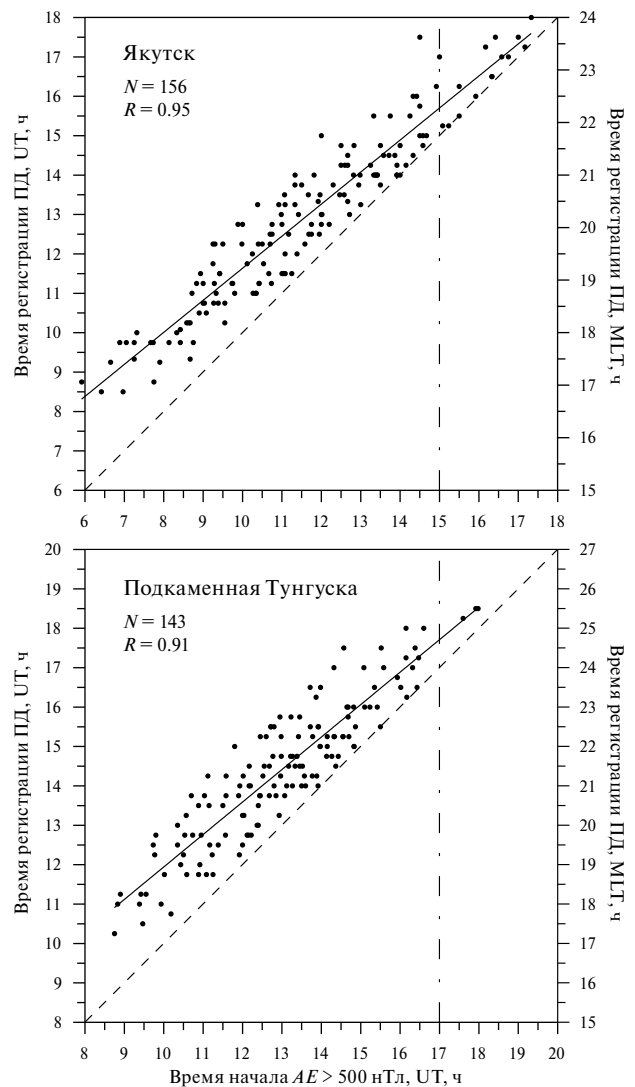


Рис. 3. Зависимость времени появления ПД над станциями Якутск и Подкаменная Тунгуска от времени регистрации начала вспышки AE -индекса. Эти времена совпадают на пунктирной линии. Сплошные линии показывают линейные аппроксимации. Локальная полночь в Якутске и Подкаменной Тунгуске отмечена штрихпунктирной линией.

время начала развития ПД. Механизм, описывающий возникновение и развитие ПД, должен непременно учитывать инъекции энергичных частиц во время суббурь.

4. ХАРАКТЕРИСТИКИ ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ И ПОТОКИ ПЛАЗМЫ ВВЕРХ В ОБЛАСТИ РАЗВИТИЯ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ДЖЕТА

Формирование ПД в ионосфере во время развития магнитосферных суббурь приводит к изменениям характеристик плазмы. В области формирования

ПД плотность плазмы понижена, иногда на порядок величины, и одновременно существенно повышена температура плазмы [Anderson et al., 1991; Mofett et al., 1998; Rodger et al., 1992; Степанов и др., 2011]. Хорошие примеры наблюдения ПД в слое *F* ионосферы на спутнике DE-2 приведены в работе [Anderson et al., 1991]. На рис. 1 в этой работе видно, что значительный дрейф плазмы на запад сопровождается не только провалом плотности плазмы и подъемом ее температуры, но и значительным движением плазмы вверх. По-видимому, первые наблюдения больших потоков ионов кислорода вверх из области развития ПД были описаны ранее в работе [Yeh, Foster, 1990]. Авторы проанализировали данные радара некогерентного рассеяния в Миллстоун Хилле и обнаружили потоки ионов вверх с чрезвычайно высокими скоростями, на высоте 1000 км иногда превышающими 3 км/с. Потоки вверх наблюдались одновременно с регистрацией быстрого дрейфа ионов на запад во время сильной магнитной бури 8 февраля 1986 г. на инвариантной широте 57° около 18:00 MLT. Температура ионов в этой области была повышена и превосходила 4000 К. (Обычная температура ионов на этих высотах 1000—2000 К). По оценкам авторов поток ионов кислорода вверх был $\geq 3 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$.

Позже по спутниковым и наземным данным было показано, что развитие ПД всегда сопровождается значительными потоками плазмы вверх из ионосферы [Wang, Luhr, 2013; Халипов и др., 2016; Степанов и др., 2019]. По доплеровским данным наземных ионозондов во время суббурь наблюдаются значительные потоки плазмы со скоростями до 150—180 м/с вдоль магнитного поля из слоя *F*-ионосферы. По данным дрейфметров на спутниках серии DMSP в верхней ионосфере на высотах ~850 км одновременно с дрейфом плазмы на запад скорости вертикальных дрейфов достигали 1.5—2.0 км/с. Максимумы потоков на запад и потоков вверх не всегда совпадают, но в узком широтном интервале, в котором существует ПД, регистрируются и вертикальные потоки [Степанов и др., 2019].

5. ФОРМИРОВАНИЕ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ В ПЛАЗМОСФЕРЕ

Наблюдаемые потоки плазмы вверх из области развития поляризационного джета в ионосфере, возможно, связаны с неоднородностями распределения плотности во внешних областях плазмосферы и пограничном слое плазмосферы [Kotova et al., 2023].

Для анализа характеристик тепловой плазмы в плазмосфере Земли удобно использовать данные чешского субспутника МАГИОН-5 проекта ИНТЕРБОЛ, ибо измерения на этом субспутнике

проводились с помощью широкоугольного анализатора тепловых ионов ПЛ-48 с очень хорошим временным разрешением, энергетический спектр протонов ($<25 \text{ эВ}$) измерялся за 0.4 с каждые 8 с. МАГИОН-5 был запущен вместе с основным аппаратом ИНТЕРБОЛ-2 в августе 1996 г. на околоземную орбиту с наклоном $\sim 65^\circ$ и периодом обращения вокруг Земли около 6 часов. К сожалению, через день после запуска связь с субспутником была потеряна, но почти через 2 года ее удалось восстановить. Штанга, на которой был установлен широкоугольный анализатор тепловых ионов ПЛ-48, также открылась не сразу, поэтому данные были получены с августа 1999 г. по июль 2001 г.

При расчете параметров плазмы по измеренным энергетическим спектрам предполагалось, что частицы распределены по закону Максвелла, но с учетом частичного экранирования потенциалом космического аппарата. Методика обработки данных подробно описана в работе [Kotova et al., 2014].

Для анализа ионосферных дрейфов и характеристик плазмы в ионосфере использованы данные комплекса аппаратуры SSIES (<https://dmisp.bc.edu/html2/ssiesgeneral.html>) DMSP SSIES INSTRUMENT CHARACTERISTICS (bc.edu), установленной на спутниках DMSP (HYPERLINK http://cedar.openmadrigal.org/list/Experiments?isGlobal=on&categories=9&instruments=8100&showDefault=on&start_date_0=1950-01-01&start_date_1=00%3A00%3A00&end_date_0=2023-12-31&end_date_1=23%3A59%3A59) List Madrigal experiments (openmadrigal.org)).

На рис. 4 показаны профили плотности протонов в зависимости от инвариантной широты (Λ), полученные на спутнике МАГИОН-5 28 сентября 2000 г., 30 октября 2000 г. и 27 ноября 2000 г. Под ними на этом рисунке приведены скорости ионов и плотность электронов в верхней ионосфере на высоте около 850 км, измеренные на спутниках F15 и F12. Вертикальной штриховой линией отмечена максимальная скорость западного дрейфа ионов в ионосфере, что соответствует пересечению спутником ПД. На нижних панелях показаны изменения *AE*-индекса в соответствующие периоды измерений на спутниках.

На левых панелях рис. 4 представлены измерения, проведенные 28 сентября 2000 г. В плазмосфере плотность постепенно спадает к внешним *L*-оболочкам, хотя некоторые неоднородности наблюдались и при $L < 3$. Перед плазмопаузой ($L \approx 4.3$) в послеполуночном секторе видна область повышенной плотности плазмы при $58^\circ < \Lambda < 61^\circ$. За 8.5 часов до этого в вечернем секторе верхней ионосферы в северном полушарии на той же *L*-оболочке был зарегистрирован классический ПД. Максимальная скорость дрейфа ионосферной плазмы в западном направлении была $V_r \sim 1500 \text{ м/с}$,

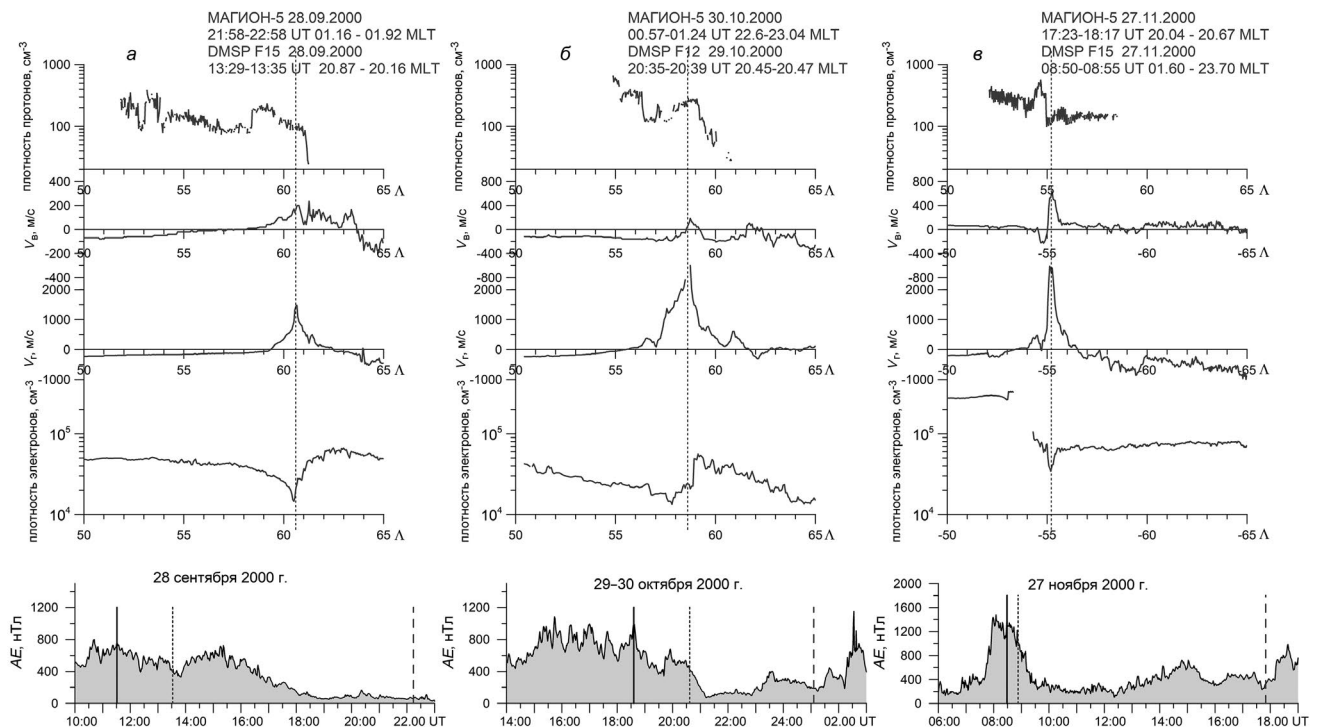


Рис. 4. Примеры наблюдения возрастаний плотности во внешней плазмосфере (а, в) или в пограничном слое плазмосферы (б) и сопряженных наблюдений ПД в верхней ионосфере. Сверху вниз показаны зависимости от инвариантной широты в градусах (Λ): вариаций плотности протонов вдоль орбиты спутника МАГИОН-5, скоростей дрейфа ионов в вертикальном (V_v) и горизонтальном (V_g) направлениях и плотности электронов по данным спутников DMSP F15 и F12. Точечной линией отмечены максимальные скорости западного дрейфа. На нижних панелях показаны вариации AE -индекса за соответствующие дни. Штриховыми и точечными линиями отмечены времена измерений соответственно на спутниках МАГИОН-5 и DMSP. Сплошными линиями показаны пики AE , ответственные за формирование ПД.

в направлении от Земли — $V_v \sim 200$ м/с, одновременно наблюдался провал плотности плазмы.

На средних панелях рис. 4 видно, что в плазмосфере плотность ионов в среднем достаточно резко падала, как это происходит обычно в пограничном слое плазмосферы [Kotova et al., 2018]. Спутник пересек плазмопаузу при $\Lambda \sim 55$ ($L = 3.04$). Однако на инвариантной широте ~ 58 — 59.5° плотность существенно повышена (“горб”), и на той же широте в ионосфере за 4.5 ч до наблюдений на МАГИОНе-5 спутником DMSP F12 был зарегистрирован ПД с максимальной скоростью западного дрейфа $V_g \sim 3000$ м/с и небольшой скоростью дрейфа вверх $V_v \sim 200$ м/с. Во время регистрации этого ПД плотность в ионосфере была понижена. 29 октября 2000 г. примерно с 15:00 UT наблюдались ряд всплесков AE -индекса, последний из них в 18:35 UT, по-видимому, вызвал формирование ПД, который 2 часа спустя в 20:37 UT и был зарегистрирован в вечернем секторе ионосферы.

На правых панелях рис. 4 показаны данные, полученные 27 ноября 2000 г. В области инвариантных широт $54^\circ < \Lambda < 55^\circ$ в плазмосфере плотность повышена относительно соседних областей в 3—5 раз.

С точностью до 0.5° на той же инвариантной широте за 8.5 часов до регистрации этой области в плазмосфере ионосферный спутник DMSP F15 пересек область развития классического ПД ($V_g \sim 2800$ м/с, $V_v \sim 600$ м/с, провал плотности электронов) в околополночном секторе местного времени в южном полушарии. За ~ 20 мин до регистрации ПД всплеск индекса AE указал на развитие суббури в магнитосфере.

Видно, что все приведенные случаи наблюдения “горбов” плотности тепловой плазмы во внешней плазмосфере или в области пограничного слоя плазмосферы сопровождались регистрацией ПД за несколько часов до этого на тех же L -оболочках в ионосфере.

Для надежного расчета траектории и времени перемещения элемента плазмы из ионосферы в магнитосферу нужны аккуратные сложные теоретические расчеты с учетом перезарядки ионов, столкновений частиц, волновых взаимодействий и т.д. Грубые оценки времени задержки отклика магнитосферной плазмы на изменения в ионосфере, связанные с развитием ПД были сделаны в работе [Kotova et al., 2023]. Расстояние вдоль

магнитной силовой линии при $L \sim 3-4$ между местом регистрации ПД и областью измерений в плазмосфере в приближении дипольного магнитного поля составляет приблизительно 3 радиуса Земли. Считая, что плазма дрейфует вдоль силовой линии со скоростью ≤ 1 км/с, можно предположить, что время задержки составляет 5.5 часов, что по порядку величины соответствует наблюдениям, представленным на рис. 4.

Магнитное локальное время (MLT) измерений в плазмосфере и ионосфере также различается. 28 сентября 2000 г. эта разница, видимо, максимальна и составляет более 4-х часов, а 29—30 октября — менее 2-х часов. В работе [Kotova et al., 2023] рассмотрены еще 2 примера сопряженных измерений в ионосфере и плазмосфере, 12 февраля и 12 ноября 2000 г., в которых данные получены при близких локальных временах. Сдвиги по MLT связаны с двумя противоположно направленными движениями плазмы. С одной стороны, высокая скорость ионосферной плазмы в западном направлении в полосе ПД должна привести к значительному смещению плазмы к западу за время от наблюдений DMSP до измерений МАГИОН-5. С другой стороны, за это время Земля вместе с ионосферой и плазмосферой поворачивается на восток под орбитой спутника. Линейная скорость коротации плазмы на высоте спутника МАГИОН-5 (~ 13500 км) равна ~ 1500 м/с, т. е. сравнима со скоростью плазмы в ПД. В зависимости от реального соотношения этих скоростей локальные времена MLT могут совпадать или различаться.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Известно, что развитие суббурь в магнитосфере Земли связано с взаимодействием потоков солнечного ветра с магнитосферой Земли при повышении динамического давления в солнечном ветре и/или при изменении знака компонента межпланетного магнитного поля, направленного вдоль магнитного диполя Земли, с северного на южное. Развитие суббурь в хвосте магнитосферы приводит к инжекции энергичных ионов (20—50 кэВ) в ближнюю магнитосферу и усилению кольцевого тока около Земли.

Экспериментальные данные показали, что формирование поляризационного джета в ионосфере связано с развитием суббурь в магнитосфере. Экваториальная граница полосы поляризационного джета физически взаимосвязана с внутренней границей инжекции энергичных ионов, приближающейся к Земле во время суббурь. Эти границы формируются на одних и тех же L -оболочках.

В свою очередь, развитие ПД сопряжено с изменением характеристик плазмы в ионосфере. В области формирования ПД плотность плазмы

понижена, иногда на порядок величины, и одновременно существенно повышена температура плазмы. Кроме того, одновременно с дрейфом плазмы на запад обычно наблюдается и дрейф плазмы вверх.

Плазмосфера Земли, по существу, является продолжением ионосферы на большие высоты [Lemaire, Gringauz, 1998; Котова, 2007]. Считается, что плазмосфера начинается с высоты (≥ 1000 км), где ионы водорода замещают ионы кислорода и становятся основным компонентом плазмы. Потоки плазмы в среднем днем направлены вверх из ионосферы в плазмосферу и составляют $\sim 10^8$ см $^{-2}$ с $^{-1}$, а ночью потоки плазмы текут в среднем вниз из плазмосферы в ионосферу. Существует множество теоретических моделей на основе гидродинамического и кинетического подходов, в которых рассмотрены процессы опустошения и заполнения плазмосферы [Кринберг, Тащилин, 1984; Lemaire, Gringauz, 1998; Khazanov, 2011; Kitamura et al., 2021; др.]. Во время развития ПД поток ионов из ионосферы можно оценить следующим образом. При плотности электронов в верхней ионосфере $\sim 5 \cdot 10^4$ см $^{-3}$, и скорости вверх ~ 400 м/с, поток электронов вверх из области развития ПД $\sim 2 \cdot 10^9$ см $^{-2}$ с $^{-1}$, и эта величина на порядок больше среднего дневного потока ионов из ионосферы в плазмосферу. Этот локальный поток плазмы вверх приводит к изменению характеристик плазмы в плазмосфере и появлению ограниченных областей повышенной плотности плазмы. Несмотря на то, что ПД развивается только во время суббурь и в ограниченной области пространства, такой поток нельзя не учитывать при построении моделей взаимодействия ионосферы и плазмосферы.

Таким образом, последствия суббурь наблюдаются практически во всей магнитосфере и ждут своего теоретического описания.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны организаторам и создателям за возможность использования базы данных по индексам геомагнитной активности “<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html>” Geomagnetic Data Service (kyoto-u.ac.jp), базы данных спутника “http://sd-www.jhuapl.edu/AMPTE/summary_images/summary_image_files/” Index of /AMPTE/summary_images/summary_image_files (jhuapl.edu).

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа А.Е. Степанова выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 21-55-50013.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Галеев А.А. Механизм магнитосферной суббури // Успехи физ. наук. 1979. Т. 127. № 3. С. 535—536.
<https://doi.org/10.3367/UFNr.0127.1979031.0535>
- Гальперин Ю.И., Пономарев В.Н., Зосимова А.Г. Прямые измерения скорости дрейфа ионов в верхней ионосфере во время магнитной бури // Космич. исслед. 1973. Т. 11. № 2. С. 273—296.
- Демин М.Г. Ионосфера Земли // Плазменная гелиогеофизика. В 2 т. Т. 2 / Под ред. Л.М. Зеленого, И.С. Веселовского. М.: Физматлит, 2008. С. 92—163.
- Котова Г.А. Плазмосфера Земли. Современное состояние исследований // Геомагнетизм и аэрoномия. 2007. Т. 47. С. 1—16.
<https://doi.org/10.1134/S0016793207040019>
- Кринберг И.А., Тащилин А.В. Ионосфера и плазмосфера. М.: Наука, 1984. 177 с.
- Степанов А.Е., Халипов В.Л., Бондарь Е.Д. Со-
поставление характеристик поляризационного
джета на разнесенных станциях Якутск — Подка-
менная Тунгуска // Космич. исслед. 2008. Т. 46.
№ 2. С. 116—121.
<https://doi.org/10.1134/S0010952508020032>
- Степанов А.Е., Голиков И.А., Попов В.И., Бон-
дарь Е.Д., Халипов В.Л. Структурные особен-
ности субавроральной ионосферы при возникно-
влении поляризационного джета // Геомагнетизм
и аэрoномия. 2011. Т. 51. № 5. С. 643—649.
<https://doi.org/10.1134/S0016793211050136>
- Степанов А.Е., Халипов В.Л., Котова Г.А., Забо-
лоцкий М.С., Голиков И.А. Данные наблюдений
крупномасштабной конвекции плазмы в магни-
тосфере в зависимости от уровня геомагнитной
активности // Геомагнетизм и аэрoномия. 2016.
Т. 56. № 2. С. 194—199.
<https://doi.org/10.1134/S0016793216010114>
- Степанов А.Е., Халипов В.Л., Голиков И.А., Бон-
дарь Е.Д. Поляризационный джет: узкие и бы-
стрые дрейфы субавроральной ионосферной
плазмы. Якутск: Издательский дом СВФУ, 2017.
176 с.
- Степанов А.Е., Кобякова С.Е., Халипов В.Л., Ко-
това Г.А. Результаты наблюдений дрейфов ио-
носферной плазмы в области поляризационного
джета // Геомагнетизм и аэрoномия. 2019. Т. 59.
№ 5. С. 578—581.
<https://doi.org/10.1134/s001679321905013x>
- Халипов В.Л., Гальперин Ю.И., Степанов А.Е.,
Шестакова Л.В. Формирование поляризацион-
ного джета в ходе взрывной фазы суббури: ре-
зультаты наземных измерений // Космич. ис-
след. 2001. Т. 39. Вып. 3. С. 244—253.
<https://doi.org/10.1023/A:1017573319665>
- Халипов В.Л., Степанов А.Е., Котова Г.А., Бон-
дарь Е.Д. Вариации положения поляризацион-
ного джета и границы инжекции энергичных
ионов во время суббури // Геомагнетизм и аэрo-
номия. Т. 56. № 2. С. 187—193. 2016а.
<https://doi.org/10.1134/S0016793216020080>
- Халипов В.Л., Степанов А.Е., Котова Г.А., Ко-
бякова С.Е., Богданов В.В., Кайсин А.В., Панчен-
ко В.А. Вертикальные скорости дрейфа плазмы
при наблюдении поляризационного джета по
наземным доплеровским измерениям и данным
дрейфометров на спутниках DMSP // Геомагне-
тизм и аэрoномия. Т. 56. № 5. С. 568—578. 2016б.
<https://doi.org/10.1134/S0016793216050066>
- Anderson P.C., Heelis R.A., Hanson W.B. The ion-
ospheric signatures of rapid subauroral ion drifts //
J. Geophys. Res. 1991. V. 96. № A4. P. 5785—5792.
<https://doi.org/10.1029/90JA02651>
- Anderson P.C., Hanson W.B., Heelis R.A., Cra-
ven J.D., Baker D.N., Frank L.A. A proposed pro-
duction model of rapid subauroral ion drifts and
their relationship to substorm evolution // J. Geo-
phys. Res. 1993. V. 98. P. 6069—6078.
<https://doi.org/10.1029/92JA01975>
- Foster J., Burke W. SAPS: A new categorization for
subauroral electric fields // EOS Trans. AGU. 2002.
V. 83. P. 293—294.
<https://doi.org/10.1029/2002EO000289>
- Foster J.C., Vo H.B. Average characteristics and activ-
ity dependence of the subauroral polarization stream //
J. Geophys. Res. 2002. V. 107. № A12. P. 1475.
<https://doi.org/10.1029/2002JA009409>
- Galperin Yu.I., Ponomarev V.N., Zosimova A.G.
Plasma convection in the polar ionosphere // Ann.
Geophys. 1974. V. 30. P. 1—7.
- Gloeckler G., Ipavich F.M., Studemann W., et al. The
charge-energy-mass-spectrometer for 0.3—300 keV/e
ions on the Amptec CCE // IEEE Transactions on
Geoscience and Remote Sensing. 1985. V. GE_23.
№ 3. P. 234—240.
<https://doi.org/10.1109/TGRS.1985.289519>
- Khalipov V.L., Galperin Yu.I., Stepanov A.E., Bon-
dar' E.D. Formation of polarization jet during in-
jection of ions into the inner magnetosphere // Adv.
Space Res. 2003. V. 31. № 5. P. 1303—1308.
[https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(03\)00016-4](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(03)00016-4)
- Khazanov G. Kinetic theory of the inner magneto-
spheric plasma // Astrophysics and Space Science
Library 372. New York: Springer, 2011.
<https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6797-8>
- Kitamura N., Seki K., Keika K., Nishimura Y.,
Hori T., Hirahara M., Lund E.J., Kistler L.M.,
Strangeway R.J. On the relationship between energy
input to the ionosphere and the ion outflow flux un-
der different solar zenith angles // Earth Planets and
Space. 2021. V. 73. № 202.
<https://doi.org/10.1186/s40623-021-01532-y>

- Kotova G., Bezrukikh V., Verigin M. The effect of the Earth's optical shadow on thermal plasma measurements in the plasmasphere // *J. Atm. Solar-Terr. Phys.* 2014. V. 120. P. 9–14.
https://doi.org/10.1016/j.jastp.2014.08.013
- Kotova G., Verigin M., Lemaire J., Pierrard V., Bezrukikh V., Smilauer J. Experimental study of the plasmasphere boundary layer using MAGION5 data // *J. Geophys. Res.* 2018. V. 123. P. 1251–1259.
https://doi.org/10.1002/2017JA024590
- Kotova G., Khalipov V., Stepanov A., Bezrukikh V. Signatures of the polarization jet in the plasmasphere // *J. Atm. Sol.-Terr. Phys.* 2023. Available at SSRN (Social Science Research Network).
http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4454933
- Landry R.G., Anderson P.C. An auroral boundary-oriented model of subauroral polarization streams (SAPS) // *J. Geophys. Res.* 2018. V. 123. P. 3154–3169.
https://doi.org/10.1002/2017JA024921
- Lemaire J.F. and Gringauz K.I. with contribution from Carpenter D.L. and Bassolo V. *The Earth's Plasmasphere*. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.
- Moffett R.J., Ennis A.E., Bailey G.J., Heelis R.A., Brace L.H. Electron temperatures during rapid subauroral ion drift events // *Ann. Geophysicae*. 1998. V. 16. P. 450–459.
https://doi.org/10.1007/s00585-998-0450-x
- Ness N.F. The Earth's magnetic tail // *J. Geophys. Res.* 1965. V. 70. P. 2989–3005.
https://doi.org/10.1029/JZ070i013p02989
- Rodger A.S., Moffett R.J., Quesgan S. The role of the ion drift in the formation of ionization troughs in the mid- and high-latitude ionosphere — A Review // *J. Atm. Terr. Phys.* 1992. V. 54. P. 1–30.
https://doi.org/10.1016/0021-9169(92)90082-V
- Smiddy M., Kelley M.C., Burke W.J., Rich R., Sagalyn R., Shuman B., Hays R., Lai S. Intense poleward directed electric fields near the ionospheric projection of plasmapause // *Geophys. Res. Lett.* 1977. V. 4. P. 543–546.
https://doi.org/10.1029/GL004i011p00543
- Southwood D.J., Wolf R.A. An assessment of the role of precipitation in magnetospheric convection // *J. Geophys. Res.* 1978. V. 83. P. 5227–5232.
https://doi.org/10.1029/JA083iA11p05227
- Spiro R.W., Heelis R.A., Hanson W.B. Rapid subauroral ions drifts observed by Atmospheric Explorer C // *Geophys. Res. Lett.* 1979. V. 6. № 8. P. 657–660.
https://doi.org/10.1029/GL006i008p00657
- Stephens G.K., Sitnov M.I., Korth H., Tsyganenko N.A., Ohtani S., Gkioulidou M., Ukhorskiy A.Y. Global empirical picture of magnetospheric substorms inferred from multimission magnetometer data // *J. Geophys. Res.* 2019. V. 124. P. 1085–1110.
https://doi.org/10.1029/2018JA025843
- Wang H., Lühr H. Seasonal variation of the ion upflow in the topside ionosphere during SAPS (subauroral polarization stream) periods // *Ann. Geophys.* 2013. V. 31. P. 1521–1534.
https://doi.org/10.5194/angeo-31-1521-2013
- Yeh H.C., Foster J.C. Storm time heavy ion outflow at mid-latitude // *J. Geophys. Res.* 1990. V. 95. P. 7881–7891.
https://doi.org/10.1029/JA095iA06p07881

The Substorms Impact on Processes in the Ionosphere and Plasmasphere of the Earth

G. A. Kotova¹*, V. L. Khalipov¹, A. E. Stepanov², V. V. Bezrukykh¹

¹ Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia

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

During magnetospheric substorms in the *F* region of the ionosphere and up to altitudes of ~1000 km, a polarization jet (PJ) is developed. Measurements of energetic ring current ions on the AMPTE/CCE satellite and driftmeter data on the DMSP satellites evidence that the formation of PJ is associated with the injection of energetic ions (10–100 keV) into the inner magnetosphere during substorms. In the region of PJ development, the characteristics of the ionospheric plasma change: the plasma density decreases, sometimes by an order of magnitude, and at the same time, the plasma temperature increases significantly. In addition, simultaneously with the westward plasma drift, upward plasma drift is usually observed. The upward ion flux from the region of PJ development of $\sim 10^9 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ is an order of magnitude greater than the average daytime ion flux from the ionosphere to the plasmasphere. Measurements on the MAGION-5 satellite in the plasmasphere on the same *L*-shells, where the polarization jet is recorded in the ionosphere, show an increase in the cold ion density. The density “humps” observed near the plasmapause are apparently formed due to plasma flows from the ionosphere accompanying the formation of the polarization jet. Thus, the consequences of substorms are observed throughout almost the entire magnetosphere.