

УДК 523.745;550.386

## ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ ПРОДОЛЬНЫЕ ТОКИ ВО ВРЕМЯ МАГНИТНЫХ БУРЬ 24-го СОЛНЕЧНОГО ЦИКЛА: МАРТ 2015 г. И СЕНТЯБРЬ 2017 г.

© 2020 г. Р. Ю. Лукьянова\*

Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия

\*r.lukianova@gcras.ru

Поступила в редакцию 22.04.2019 г.

После доработки 09.09.2019 г.

Принята к публикации 19.09.2019 г.

Представлены характеристики продольных токов (ПТ), полученные из наблюдений спутников *SWARM* во время двух сильных магнитных бурь 16–19.III.2015 г. и 6–9.IX. 2017 г. Бури сопровождались суббурями большой интенсивности. Спутники пересекали вечерний, полуденный, пред- и после полуночный секторы MLT. Показано, что изменения плотности ПТ и широтного положения экваториальных границ ПТ контролируются как развитием бури, так и в значительной степени – суббуревой активностью. На пике суббури средние плотности втекающих и вытекающих ПТ, достигают 3–4  $\mu\text{A}/\text{m}^2$ , в то время как невозмущенный уровень составляет около 0.2  $\mu\text{A}/\text{m}^2$ . Минимальная широта экваториальных границ ПТ ограничена  $50^\circ$  MLat. Крупномасштабные ПТ состоят из мелкомасштабных нитевидных структур с высокой плотностью тока, которые всегда присутствуют в наблюдениях *SWARM*. Мелкомасштабные пиковые токи с плотностью 50–100  $\mu\text{A}/\text{m}^2$  появляются в периоды общего повышения плотности во время активации суббурь. Локальные повышения концентрации и температуры электронов, показывают, что токовая структура может быть связана с мезомасштабной дискретной авроральной дугой.

DOI: 10.31857/S0023420620020077

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Продольные токи (ПТ), текущие вдоль силовых линий геомагнитного поля связывают ионосферу с пограничными слоями магнитосферы и солнечным ветром. ПТ переносят энергию солнечного ветра в ионосферу, замыкаются горизонтальными ионосферными токами и являются источниками ионосферных электрических полей. ПТ существуют в магнитосфере постоянно, однако их интенсивность может значительно меняться. В спокойных условиях величина ПТ составляет порядка  $10^6$  А, а во время магнитных бурь достигает  $10^7$  А.

Схематическое распределение крупномасштабных ПТ было впервые построено по данным спутника *TRIAD* [1]. Ионосферная проекция трехмерной системы ПТ состоит из пары полос, вытянутых вдоль аврорального овала, а именно, области 1 (*R1*) и области 2 (*R2*) с противоположными направлениями тока в утреннем и вечернем секторах местного времени. Интенсивность тока определяется главным образом величиной и направлением вертикальной ( $B_z$ ) компоненты межпланетного магнитного поля (ММП). Дополнительные токовые слои (*R0*) расположены в полуденном секторе к полюсу от *R1* и контролируются азимутальной ( $B_y$ ) компонентой ММП. Во время

суббурь появляются дополнительные ПТ, замыкающие ток в хвосте магнитосферы на ночную ионосферу, и образующие суббуревой токовый клин. Во время главной фазы магнитной бури низкоширотные ПТ *R2* взаимодействуют с кольцевым током [2].

Задача обнаружения и измерения ПТ решается путем измерения магнитного поля в пространстве над ионосферой. Данные нескольких космических аппаратов, предназначенных для мониторинга геомагнитного поля, позволили построить глобальные эмпирические модели ПТ, параметризованные по ММП, сезону и полушарию [3, 4]. В стационарных условиях ПТ эволюционируют в соответствии с интенсивностью пересоединения на дневной магнитопаузе, которое контролируется солнечным ветром. Во время суббури и магнитной бури ПТ становятся очень динамичными из-за высвобождения энергии, накопленной в хвосте магнитосферы, и развития кольцевого тока. Интенсивность ПТ увеличивается и может значительно превысить номинальный уровень, предсказанный моделями. Кроме того, в магнитовозмущенные периоды токовые слои смещаются к экватору. С использованием измерений магнитных вариаций спутником *CHAMP* были исследованы характеристики ПТ в дневном и ночном секторах местного времени во время маг-

нитных бурь октября и ноября 2003 г. [5]. Было показано, что плотность и широтное положение ПТ изменяются в соответствии с эволюцией геомагнитного индекса  $Dst$ , который является индикатором развития кольцевого тока. Во время магнитных бурь также может наблюдаться асимметрия утро-вечер так, что на вечерней стороне ПТ более интенсивны, чем на утренней, что связано с развитием частичного кольцевого тока. С использованием глобальных карт ПТ, полученным по данным группировки спутников *IRIDIUM* во время магнитной бури августа 2000 г., было показано, что плотность ПТ  $R2$  на вечерней стороне более чем на 10% превышает плотность утренних ПТ  $R2$  [6]. Результаты моделирования и радарные наблюдения подтверждают эффекты асимметрии [7].

Высокоточные наблюдения ПТ с увеличенным временным разрешением, которые проводились спутником *ORSTED*, выявили эффект филаментации авроральных ПТ, при которой более мелкомасштабные токи оказываются и более интенсивными. В то время как средние значения плотности ПТ обычно составляют менее единицы  $\mu A/m^2$ , мгновенные значения на частотах 25 и 100 Гц (пространственный масштаб 600 и 150 м) могут достигать нескольких сотен  $\mu A/m^2$  [8]. Интенсивные мелкомасштабные ПТ концентрируются в области дневного каспа и вблизи полуночи, вызывая здесь повышенный джоулев нагрев термосферы.

В настоящее время ПТ вычисляются по данным низколетящих спутников с полярной орбитой, входящих в группировку *SWARM*. С 2014 г. были проведены комплексные исследования статистических распределений ПТ [9–11]. Однако данные *SWARM* еще не были использованы для выявления поведения ПТ во время магнитных бурь, во время которых происходит резкое увеличение поступления и диссипации энергии солнечного ветра в околоземном пространстве, а характеристики ПТ значительно отличаются от эмпирических моделей. Эволюция ПТ варьируется от одной бури к другой, и выявление уникальных характеристик ПТ в период наиболее мощных событий представляет интерес для оценки экстремальных состояний космической погоды. В статье анализируются данные наблюдений ПТ с помощью высокоточных магнитометров, установленных на борту спутников *SWARM*, во время двух наиболее интенсивных магнитных бурь солнечного цикла 24: в марте 2015 г. и в сентябре 2017 г. Обе бури сопровождались суббуревой активностью, что оказывало значительное влияние на развитие ПТ. В задачи исследования входит определение изменения плотности ПТ, динамики экваториальной границы ПТ в зависимости от интенсивности бури и сопровождающей ее суббуревой активности, а также выявление экстремумов мелкомасштабных ПТ.

## 2. УСЛОВИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ 16–17.III.2015 г. И 6–9.IX.2017 г.

В солнечном цикле 24 произошло несколько магнитных бурь. Высота цикла была сравнительно небольшой и интенсивность бурь в терминах  $Dst$  индекса редко превышала 200 нТл. Первая буря произошла в максимуме цикла в марте 2015 г. Эта буря известна как буря Дня Святого Патрика, и ее геофизическим эффектам посвящено большое количество работ. Особенностью этой бури, источником которой была солнечная вспышка класса M, было то, что ионосферные и авроральные возмущения охватили большой диапазон широт. Уменьшение электронной концентрации в ионосфере и полярные сияния наблюдались вплоть до  $45^\circ$  широты.

Вторая рассматриваемая в данной статье буря произошла на фазе спада солнечного цикла. Она была вызвана несколькими сильными солнечными вспышками, сопровождавшимися выбросами корональной массы и межпланетными облаками, которые достигли магнитосферы Земли и вызвали интенсивную магнитную бурю. Буря привела к большим геомагнитным возмущениям, ионосферным эффектам, авроральной активности.

На рис. 1а и 1б представлены параметры солнечного ветра и геомагнитной активности для периодов 16–19.III.2015 и 6–9.IX.2017, соответственно. На графиках сверху вниз представлены ММП  $Bz$  и  $Bu$ , скорость  $V$  и плотность  $n$  солнечного ветра, геомагнитные индексы  $AE$  и  $SYM-H$  (1-минутный аналог  $Dst$  индекса). Во время обеих бурь диапазон изменения ММП  $Bz$  и  $Bu$  достигает  $\pm 25$  нТл. В обеих бурях во время внезапного начала, которое детектируется как скачкообразный рост  $SYM-H$  (в 04.30 UT 17.III.2015 и 00 UT 7.IX.2017), наблюдается поворот  $Bz$  к северу и увеличение скорости солнечного ветра. Главная фаза вызывается поворотом  $Bz$  к югу (в 07 UT 17.III.2015 и 23 UT 7.IX.2017). Рис. 1а показывает, что поворот  $Bz$  к югу, сопровождающийся также резким увеличением  $Bu$ , приводит к развитию суббури ( $AE = 2000$  нТл) и усилению кольцевого тока (уменьшение  $SYM-H$  до  $-150$  нТл). Серия непрерывно следующих друг за другом интенсификаций суббурь продолжалась до конца дня 17.III и далее в течение всей фазы восстановления.

На рис. 1б, где представлены параметры бури 7–9.IX.2017, можно видеть, что в самом начале 7.IX к магнитосфере подошел фронт межпланетного магнитного облака с повышенной плотностью ( $15 \text{ см}^{-3}$ ), скоростью (600 км/с) и поворотом ММП  $Bz$  к северу. Это вызвало подъем  $SYM-H$  до 50 нТл. С 3 до 12 UT 7.IX, в период колебаний направления ММП  $Bz$  наблюдалось развитие суббурь ( $AE$  до 1200 нТл в 10 UT). В конце 7.IX к магнитосфере прибыла вторая структура магнитного облака со скоростью  $\sim 800$  км/с и отрицательным

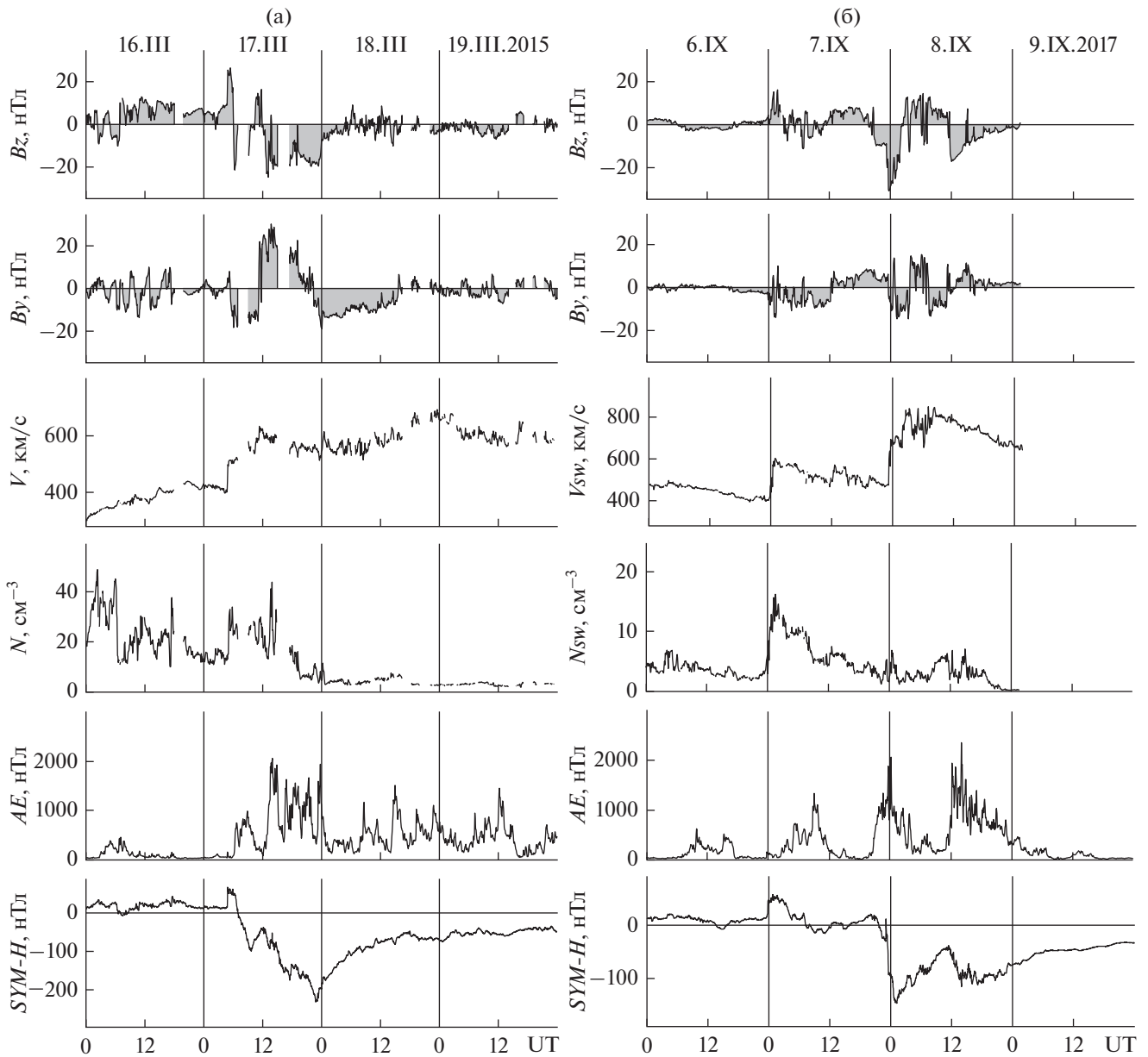


Рис. 1. Сверху вниз: 5-минутные значения ММП  $B_z$  и  $B_y$ , скорость и плотность солнечного ветра, индексы  $AE$  и  $SYM-H$  для бурь (а) 16–19.III.2015 и (б) 6–9.IX.2017 (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/>).

$B_z$ , что вызвало более интенсивную суббуревую активность (увеличение  $AE$  до 2000 нТл в 00 UT) и нарастание кольцевого тока (уменьшение  $SYM-H$  до  $-150$  нТл). После примерно 03 UT 8.IX ММП  $B_z$  становится положительным,  $AE$  постепенно приближается к нулю и  $SYM-H$  начинает восстанавливаться. В 12 UT 8.IX начинается следующий период отрицательного  $B_z$ . Это вызывает вторую серию суббурь ( $AE$  до 2000 нТл в 16 UT) и усиление кольцевого тока ( $SYM-H$  до  $-100$  нТл). Устойчивое уменьшение суббуревой активности происходит в течение 9.IX (параметры солнечного ветра в этот день недоступны), но при этом

$SYM-H$  продолжает оставаться на уровне около  $-50$  нТл. Таким образом, буря сентября 2017 г. имела две интенсификации, и главная фаза сопровождалась двумя следующими друг за другом сериями суббурь, разделенных периодом относительно низкой магнитной активности и закончившихся до завершения фазы восстановления.

### 3. СПУТНИКИ SWARM

Группировка *SWARM*, состоящая из трех идентичных КА, была выведена на орбиту в ноябре 2013 г. Спутники имеют низкую круговую орбиту,

**Таблица 1.** Параметры траекторий в северном и южном полушариях

КА	Диапазон (сектор) MLT на 50° MLat		MLT, выбранный как центр диапазона
16–19.III.2015			
Северное полушарие			
Вход	<i>SwB</i>	10:10–11:30	11:00
	<i>SwA</i>	08:50–11:10	10:00
Выход	<i>SwB</i>	22:10–23:10	23:00
	<i>SwA</i>	21:10–22:50	22:00
Южное полушарие			
Вход	<i>SwB</i>	10:20–11:50	11:10
	<i>SwA</i>	09:10–11:00	10:00
Выход	<i>SwB</i>	22:50–23:20	23:00
	<i>SwA</i>	21:20–23:10	22:00
6–9.IX.2017			
Северное полушарие			
Вход	<i>SwB</i>	02:50–04:40	04:00
	<i>SwA</i>	09:40–11:30	10:00
Выход	<i>SwB</i>	15:00–16:50	16:00
	<i>SwA</i>	20:10–22:20	22:00
Южное полушарие			
Вход	<i>SwB</i>	03:10–05:00	04:00
	<i>SwA</i>	09:10–11:00	10:00
Выход	<i>SwB</i>	14:50–16:40	16:00
	<i>SwA</i>	20:20–22:10	22:00

лежащую в меридиональной плоскости и пересекающую полярные области Земли. В номинальном режиме два КА (*SwA* и *SwC*) летят на высоте ~420 км параллельно друг другу на расстоянии 500–1000 км, долготное расстояние 1°–1.5°, наклонение орбиты 87.4°. Третий КА (*SwB*) летит в другой меридиональной плоскости на высоте ~500 км, наклонение орбиты 88°. Постепенно смещаясь по долготе, за 7–10 мес. орбиты спутников покрывают все долготные сектора земного шара.

Все КА *SWARM* оснащены идентичной аппаратурой. Основным модулем является комплекс для магнитных измерений: высокочувствительный векторный и скалярный магнетометры для определения величины и направления полного вектора и вариаций геомагнитного поля с точностью до 0.1 нТл и частотой 1 Гц. Кроме магнитометрической аппаратуры КА оснащены инструментом EFI, который включает в себя лэнгмюровский зонд, и позволяет измерять плотность и температуру электронной компоненты ионосферной плазмы. Информация о спутниках представлена

на сайте ESA (<http://earth.esa.int/swarm>). По вариациям внешнего магнитного поля, измеряемым векторным магнитометром, рассчитываются плотности ПТ по закону Ампера согласно методике [12]. 1-секундные значения плотности ПТ являются стандартным продуктом *SWARM* уровня 2 [13].

За день каждый спутник пересекает полярную область 14–15 раз по приблизительно параллельным траекториям, которые несколько смещаются по магнитному местному времени (MLT). На рис. 2 показаны полярные проекции орбит спутников 16–19.III.2015 (рис. 2а) и 6–9.IX.2017 (рис. 2б) для северного полушария. В первом случае все спутники, *SwA* (орбиты *SwA* и *SwC* практически совпадают) и *SwB*, входят в высокоширотную область MLat > 50° в предполуденном секторе и выходят из нее в предполуночном секторе. Траектории *SwB* сдвинуты относительно *SwA* на 15° на более поздние часы местного времени. Во время второго события (рис. 2б) траектории *SwA* и *SwB* расходятся и находятся в существенно разных секторах MLT. *SwA* входит в полярную область в секторе 09–12 MLT и выходит из нее в 21–23 MLT. Для *SwB* точки входа и выхода находятся в секторе 15–17 и 02–04 MLT, соответственно. В южном полушарии расположение проекций орбит аналогично, но направление движения обратное.

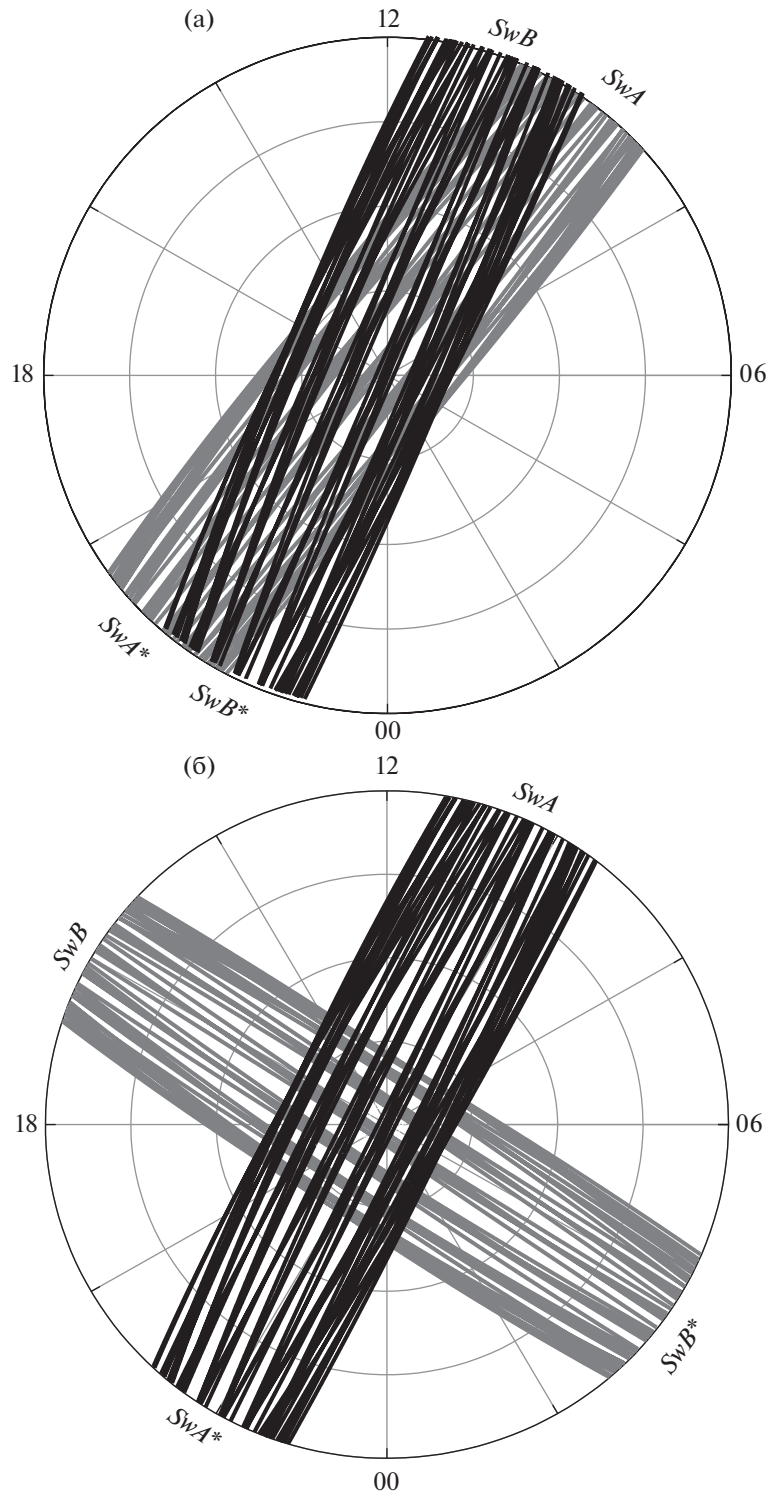
Диапазон MLT, внутри которого сдвигается орбита за сутки, представлен в табл. 1. На широтном круге 50° MLat этот диапазон составляет около двух часов MLT. С приближением к полюсу диапазон MLT увеличивается, и на широте 70° MLat он равен уже шести часам.

#### 4. ЭВОЛЮЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПТ ВО ВРЕМЯ МАГНИТНЫХ БУРЬ

##### 4.1. Плотность ПТ

Статистически крупномасштабные ПТ *R1* и *R2* имеют наибольшую плотность вблизи утреннего и вечернего меридианов. Орбиты спутников в марте 2015 г. не являются оптимальными для определения максимальных значений *R1/R2*, поскольку расположены вдоль меридиана 11–23 MLT, но они хорошо подходят для определения ПТ в дневных и ночных условиях. В сентябре 2017 г. орбиты *SwA* ориентированы практически одинаково с орбитами *SwB* в марте 2015. Орбиты *SwB* сдвинуты к линии утро–вечер, а на ночной стороне (~04 MLT) они перекрывают ионосферный западный электроджет, который усиливается во время суббури.

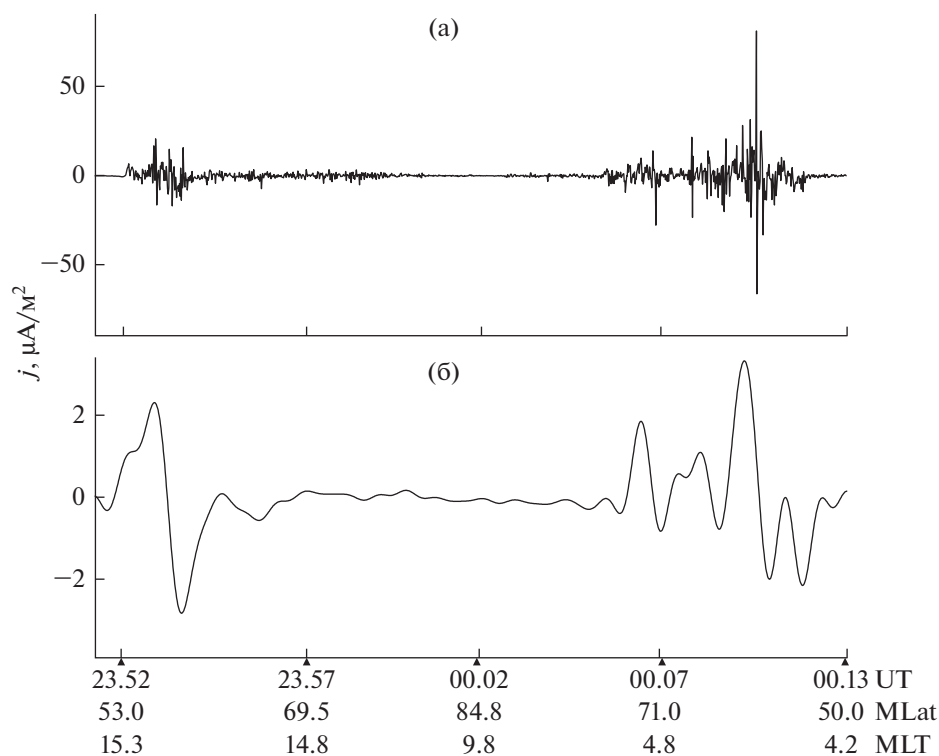
Пример плотности ПТ, которая получена по магнитному сигналу, измеренному вдоль траектории пролета *SwB* в сентябре 2017 г., показан на рис. 3. Спутник движется в северном полушарии сначала к полюсу в вечернем секторе, а затем в ранние утренние часы MLT – от полюса. Секунд-



**Рис. 2.** Орбиты  $SwA$  и  $SwB$  в северном полушарии (а) 16–19.ІІІ.2015 и (б) 6–9.ІХ.2017 в координатах MLT и магнитная широта (MLat), внешняя граница находится на  $50^\circ$  MLat, символ \* обозначает пересечение этой границы при движении в направлении экватора.

ные значения в представлены на рис. 3а, а на рис. 3б изображена сглаженная кривая (полученная с помощью фильтрации стандартной процедурой БПФ по 21 точке), в которой выделяются крупно-

масштабный втекающий в ионосферу ПТ  $R2$  и вытекающий ПТ  $R1$ . В полярной шапке ПТ практически отсутствуют. В ранние утренние часы наблюдается многослойная структура токов. Приполюсные



**Рис. 3.** (а) 1-с и (б) сглаженные значения плотности ПТ по измерениям  $SwB$  в северном полушарии с 23.50 UT 7.IX.2017 по 00.13 UT 8.IX.2017.

токи в основном положительные и относятся к втекающему ПТ R1. Затем, двигаясь к экватору,  $SwB$  пересекает вытекающие токи, относящиеся к ПТ R2.

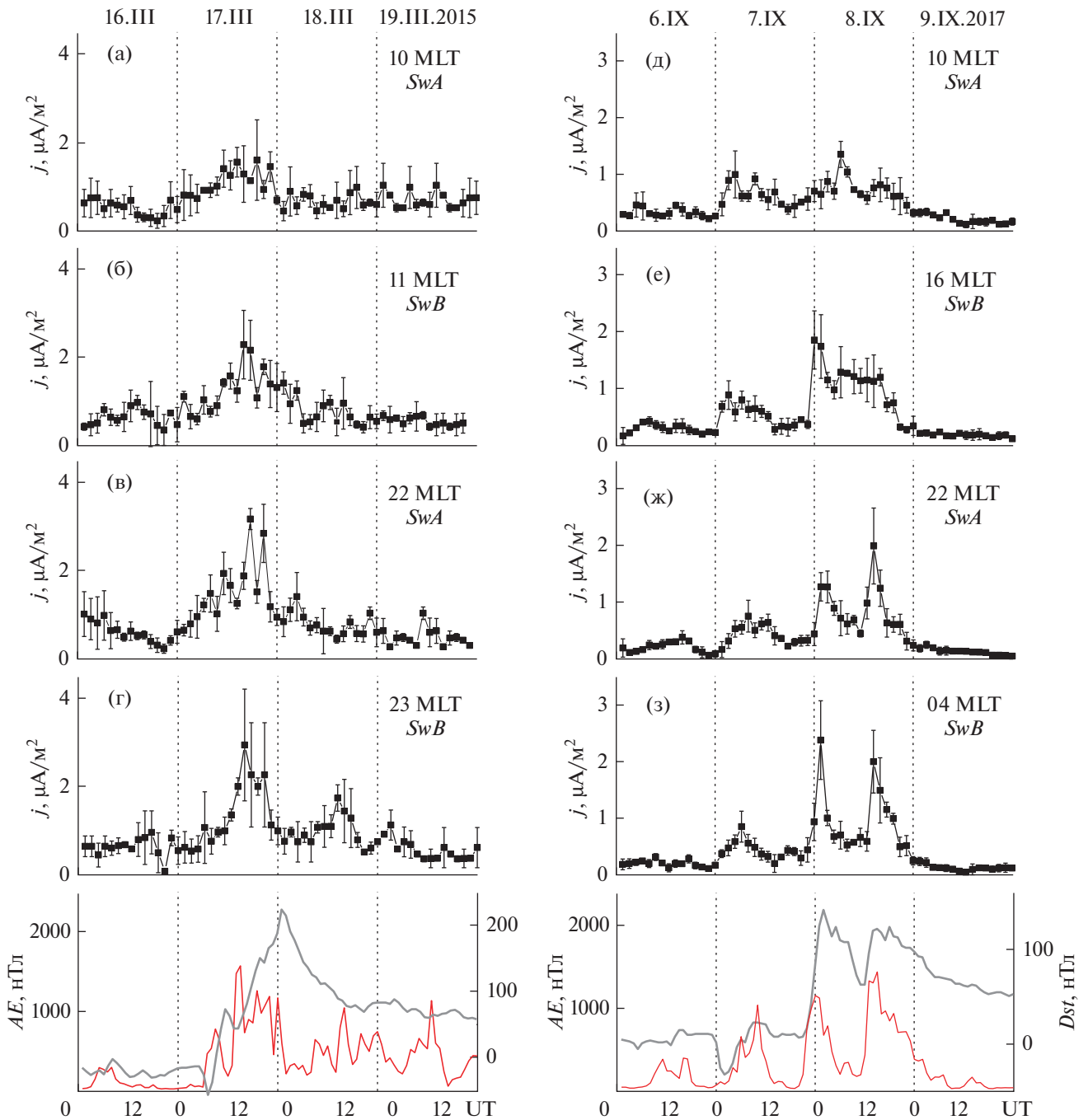
На рис. 4 представлено изменение интенсивности ПТ в ходе бурь 16–19.III.2015 (рис. 4а–4г) и 5–9.IX.2017 (рис. 4д–4з). Графики, расположенные сверху вниз, показывают модуль плотности ПТ, усредненной вдоль каждой траектории пролета в определенном секторе MLT в обоих полушариях (диапазоны MLT, соответствующие каждому сектору, и центральное MLT представлены в таблице). Каждая точка определяется путем усреднения секундных значений абсолютной величины плотности тока на отрезке траектории, экваториальная граница которой определяется как точка, где токи перестают идентифицироваться из-за их малости. Полярная граница определяется либо так же, либо как наименьшая MLat для данной траектории. На самых нижних графиках представлен ход геомагнитных индексов  $AE$  и  $Dst$ .

Во время бури 16–19.III.2015 плотность ПТ изменяется от  $\sim 0.5 \mu\text{A}/\text{m}^2$  в период непосредственно предшествующий буре до  $4 \mu\text{A}/\text{m}^2$ . На дневной стороне (рис. 4а, 4б) плотность повышается до уровня  $2 \mu\text{A}/\text{m}^2$ . Наибольшие значения плотности характерны для полуночного сектора в период главной фазы бури (рис. 4в, 4г). Сравнивая эволюцию интенсивности тока с  $AE$  и  $Dst$  индексами, можно видеть, что максимум тока достигается

примерно на 8 ч раньше пика  $Dst$  и совпадает с максимумом интенсификации суббуревого электроджета. С окончанием суббури ПТ затухают, следуя изменению  $AE$  индекса. На фазе восстановления, хотя  $Dst$  довольно долго остается повышенным ( $-80$  нТл), ПТ возвращаются к спокойному уровню.

Во время бури 6–9.IX.2017 плотности ПТ изменяются от  $\sim 0.2$  до  $3 \mu\text{A}/\text{m}^2$  и имеют три ярко выраженных пика. Первый, сравнительно небольшой пик наблюдается 7.IX, когда на магнитосферу воздействует фронт динамического давления солнечного ветра. Дневные ПТ (рис. 4д, 4е) реагируют без каких-либо задержек на этот шок, в то время как ночные ПТ (рис. 4ж, 4з) начинают увеличиваться позже вместе с развитием суббури. Два более высоких пика появляются в самом начале и в середине дня 8.IX. Они совпадают с развитием суббури большей интенсивности во время главной фазы бури. Интенсивность конкретного пика плотности тока варьируется в разных секторах MLT, а наиболее четко пики проявляются в ранние утренние часы (рис. 4з). На фазе восстановления 9.IX плотность ПТ не превышает  $\sim 0.2 \mu\text{A}/\text{m}^2$ .

В марте 2015 г.  $Dst$  достигало  $-220$  нТл, а в сентябре 2017 г. — только  $-130$  нТл. При этом интенсивность суббурь была примерно одинаковой. Максимум плотности ПТ во время обеих бурь был также практически одинаковым и достигал



**Рис. 4.** Плотность ПТ в ходе бурь (а–г) 16–19.ІІІ.2015 и (д–з) 6–9.ІХ.2017. На нижних графиках показаны индексы *AE* и *Dst* (последний с обратным знаком для удобства сравнения с *AE*).

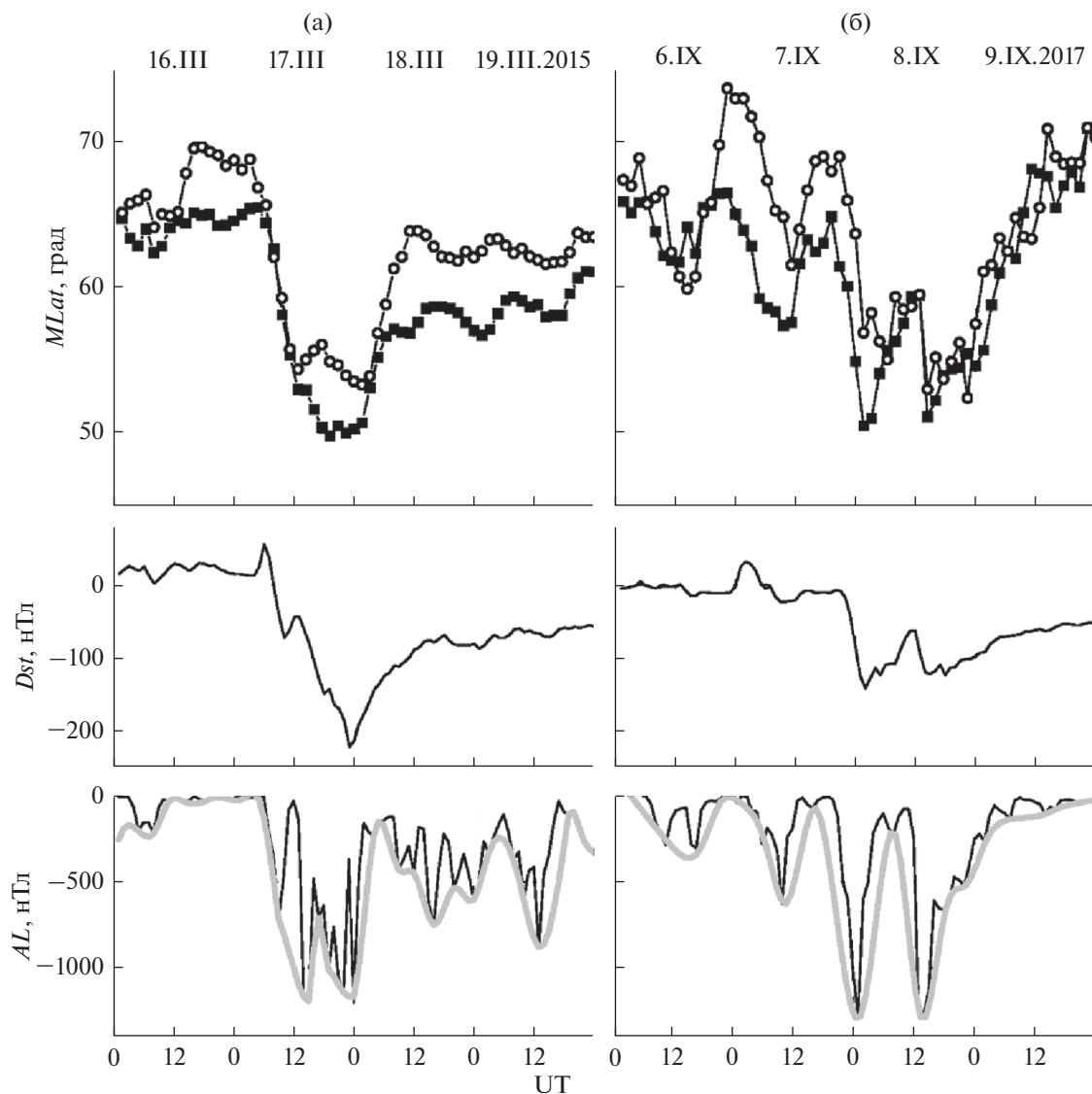
3  $\mu\text{A}/\text{m}^2$  на ночной стороне и 2  $\mu\text{A}/\text{m}^2$  на дневной стороне. Наибольшее повышение плотности тока характерно для полуночных и ранних утренних часов, а наименьшее – в секторе 10 MLT.

#### 4.2. Динамика экваториальной границы ПТ

Усиление воздействия солнечного ветра на магнитосферу и накопление открытого магнитно-

го потока во время геомагнитной бури приводят к расширению полярной шапки и аврорального овала в целом [например, 14]. Следуя динамике магнитосферы, ПТ также смещаются по экватору. На рис. 5 показана эволюция экваториальной границы ПТ (в терминах MLat, усреднение по обоим полушариям) в предполуденном и предполуночном секторах местного времени 16–19.ІІІ.2015 (рис. 5а) и 6–9.ІХ.2017 (рис. 5б). Граница области,





**Рис. 5.** Широтное положение предполуденной (кружки) и предполуночной (черные точки) экваториальных границ ПТ (а) 16–19.ІІІ.2015 и (б) 6–9.ІХ.2017. На нижних графиках показаны среднечасовые значения  $Dst$  и  $AL$  индексов. Для  $AL$  также показана огибающая  $AL^*$ , построенная по двум соседним максимумам.

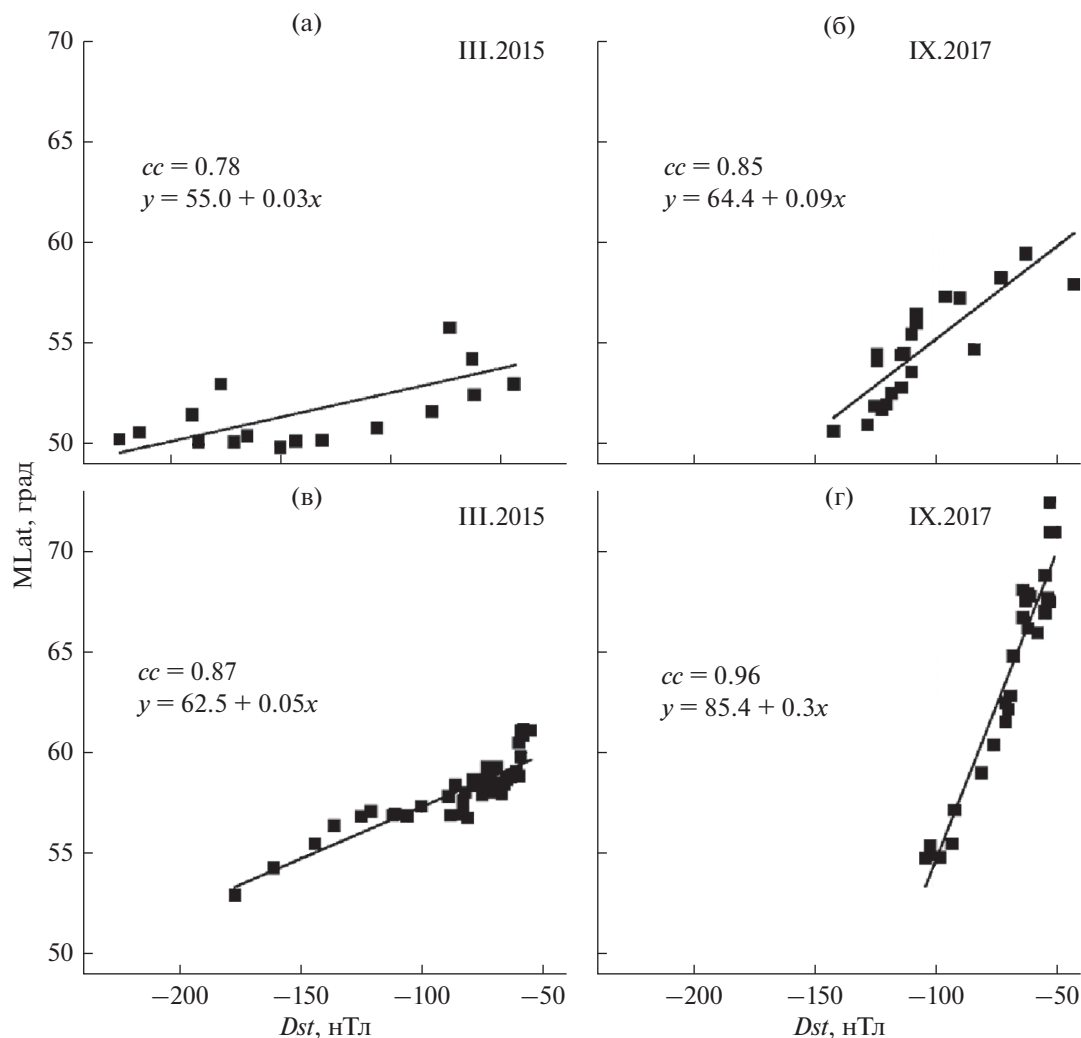
занятой током, определялась как широта, выше которой по крайней мере в пяти точках измерений подряд плотность ПТ по модулю равна или больше  $0.1 \mu\text{A}/\text{m}^2$ . На нижних графиках показаны среднечасовые значения  $Dst$  и  $AL$  индексов. Для  $AL$  также показана огибающая, построенная по двум соседним максимумам, которая описывает более плавное изменение  $AL$ .

Из рис. 5 видно, что в предбуриевой период ночная граница ПТ наблюдается на  $\sim 65^\circ$  MLat, а дневная достигает  $>70^\circ$  MLat. Во время главной фазы ПТ смещаются к экватору, так что ночная граница находится на  $50^\circ$  MLat, а дневная — примерно на  $54^\circ$  MLat. Минимальная широта экваториальной границы практически одинакова для обеих бурь, несмотря на то, что разница в  $Dst$  со-

ставляет почти 100 нТл. В главную и восстановительную фазы бури дневная и ночная границы смещаются практически синхронно. Коэффициент корреляции (график не показан) между их широтным положением составляет 0.94 для марта 2015 г. и 0.88 для сентября 2017. Дневная граница расположена на  $4^\circ$ – $5^\circ$  выше ночной за исключением периода восстановления 8–9.ІХ.2017, когда обе границы находились примерно на одной широте.

Наблюдались также сдвиги экваториальной границы ПТ на несколько градусов на более низкие широты, которые связаны со сравнительно небольшими суббурями, имевшими место до развития главной фазы бури (16.ІІІ.2015 и 6–7.ІХ.2017). Так, в сентябре 2017 смещение предполуночной границы на MLat  $> 70^\circ$  обусловлено смещением





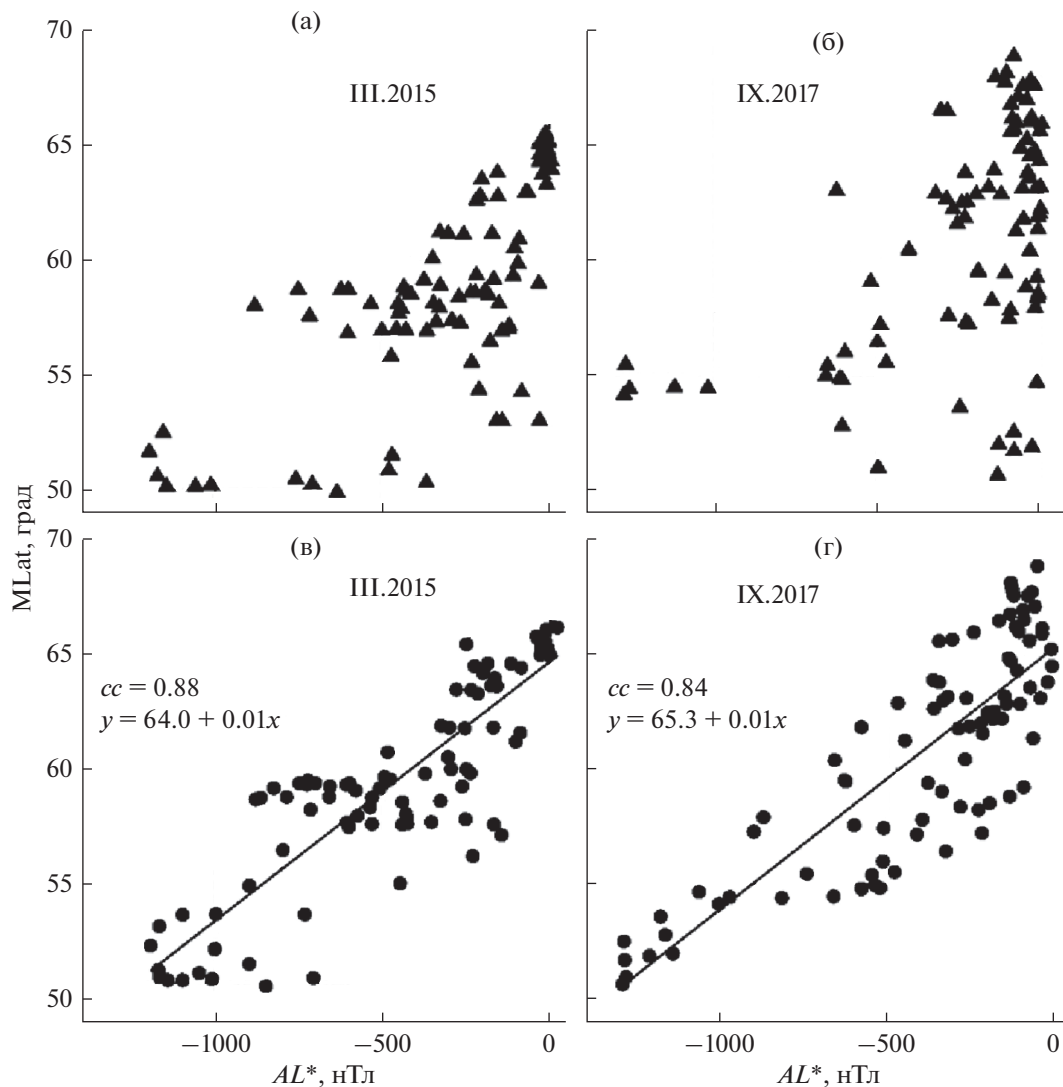
**Рис. 6.** Регрессионные соотношения и корреляции между среднечасовыми значениями *Dst* и положением ночной границы ПТ для (а, б) главной фазы и (в, г) восстановительной фазы бури марта 2015 г. (слева) и сентября 2017 г. (справа).

полярной шапки на вечернюю сторону и сокращением аврорального овала вследствие поворота ММП к северу и отрицательного ММП *B<sub>y</sub>*.

Сравнивая эволюцию положения границ и *Dst*, можно видеть качественное согласие между этими параметрами. На рис. 6 отдельно для главной ( $dDst/dt < 0$ ) и восстановительной ( $dDst/dt > 0$ ) фаз представлены корреляции между *Dst* и положением ночной границы ПТ. Среднечасовые значения *MLat* границы, соответствующие значениям *Dst*, были получены с помощью сплайн-интерполяции. В главную фазу бури коэффициент корреляции между двумя параметрами составляет 0.73 (март 2015 г.) и 0.85 (сентябрь 2017 г.), а в восстановительную – соответственно, 0.87 и 0.96. Более слабая корреляция в главную фазу бури марта 2015 г. связана с тем, что как видно из рис. 5, суббуревая активность резко возросла за несколько часов до развития *Dst*. При этом связанные с суббурей высыпание авроральных частиц уже привело

к смещению границы ПТ к экватору. В главную фазу бури сентября 2017 г. суббуревая активность началась синхронно с уменьшением *Dst*. Область ПТ резко расширилась к экватору, а коэффициент корреляции между широтным положением границы ПТ и *Dst* увеличился. Во время восстановительной фазы корреляция между *MLat* и *Dst* очень высокая для обеих бурь. При этом скорость смещения границы ПТ обратно к полюсу в сентябре 2017 г. значительно больше, чем в марте 2015 г. Это также обусловлено тем, что в первом случае суббуревая активность продолжалась на протяжении всей фазы восстановления, а во втором – резко ослабла 9.IX, хотя *Dst* индекс восстанавливался постепенно от  $-100$  до  $-50$  нТл.

Корреляция между широтным положением ночной границы ПТ и *AL* индексом приведена на рис. 7. Для *AL* рассмотрены среднечасовые значения и значения, соответствующие огибающей *AL\** (представлены на нижних графиках рис. 5).

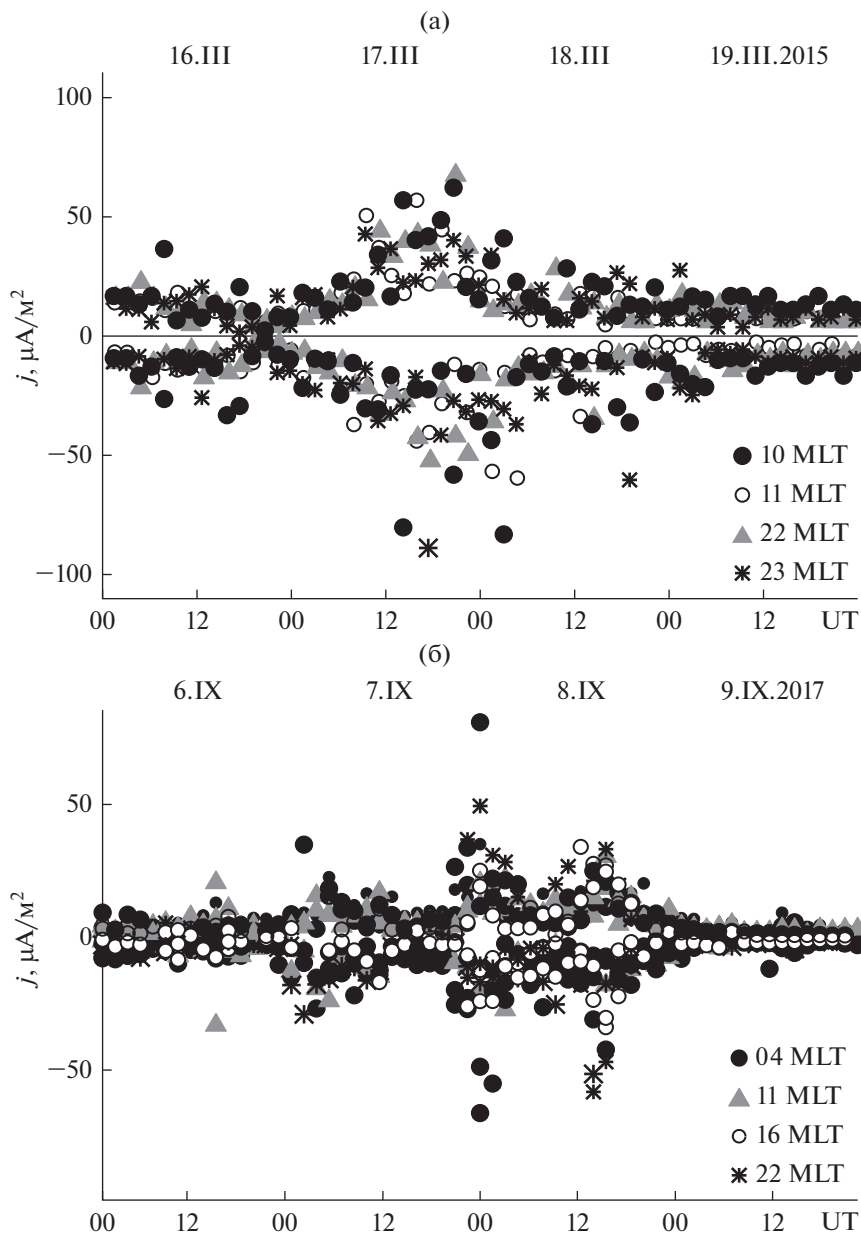


**Рис. 7.** Корреляции между  $AL$  индексом и положением ночной границы ПТ для периодов 16–19.III.2015 (слева) и 6–9.IX.2017 (справа): (а, б) среднечасовые значения  $AL$ ; (в, г) значения огибающей  $AL^*$ .

Как видно из рис. 7а, 7б корреляция между среднечасовыми значениями  $AL$  и ночной широтной границей ПТ отсутствует. Если в качестве регрессионного параметра используются значения  $AL^*$  (рис. 7в, 7г), корреляция становится значимой ( $cc = 0.88$  и  $0.84$ ). В отличие от  $Dst$  индекса, для которого коэффициенты регрессионного уравнения, описывающего бурю сентября 2017 г., существенно превышают коэффициенты уравнения для бури марта 2015 г., соотношение между  $AL^*$  индексом и ночной границей ПТ для обеих бурь практически одинаково и описывается уравнением  $MLat = 64.0 + 0.01AL^*$  (март 2015 г.) и  $MLat = 65.3 + 0.01AL^*$  (сентябрь 2017 г.). Таким образом, для двух рассмотренных бурь, в ходе которых минимум  $Dst$  отличался почти в два раза, ночная граница ПТ следует сглаженному изменению  $AL$  независимо от интенсивности бури.

#### 4.3. Экстремумы мелкомасштабных ПТ

ПТ проявляются в широком пространственном диапазоне от крупномасштабных токовых слоев шириной в сотни километров до нитевидных токов шириной в сотни метров. В целом, интенсивность тока изменяется обратно пропорционально масштабу, так что плотность крупномасштабных токов составляют единицы  $\mu A/m^2$ , а плотность тока в структурах размером до 10 км составляет несколько десятков  $\mu A/m^2$ . Стандартные 1-с значения данных измерений КА *SWARM* обеспечивают пространственный масштаб около 7.5 км. Чтобы получить временные ряды пиковых плотностей тока, из каждого пересечения заданного временного сектора MLT независимо от полушария были выбраны самые большие положительные и отрицательные секундные значения. На



**Рис. 8.** Экстремумы мелкомасштабных ПТ(секундные значения) в последовательных пролетах *SwA* и *SwB* через полярные области в период (а) 16–19.III.2015 и (б) 6–9.IX.2017.

рис. 8 представлены временные ряды пиковых значений токов, измеренных в последовательных пролетах *SwA* и *SwB* через полярную область для бурь марта 2015 г. (рис. 8а) и сентября 2017 г. (рис. 8б).

Сравнивая рис. 4 и 8, можно видеть, что мелкомасштабные пики плотности ПТ могут быть более чем на порядок больше, чем плотности, усредненные вдоль траектории. Значения  $>50 \mu\text{A}/\text{m}^2$  появляются в периоды общего повышения плотности в главную фазу бури во время активации суббурь, как например, 17–18.III.2015 и 8.IX.2017. Для бури в марте 2015 г. экстремум мелкомасштабного тока –

это вытекающий ток с плотностью  $90 \mu\text{A}/\text{m}^2$ , наблюдаемый в предполуночном секторе. Для бури в сентябре 2017 г. самая большая зарегистрированная плотность  $80 \mu\text{A}/\text{m}^2$  – у втекающего ПТ, находящегося в секторе ранних утренних часов MLT. В этом же секторе в непосредственной близости к втекающему току обнаруживаются сравнимые с ним по величине значения вытекающего тока. В целом, частота появления и величина мелкомасштабных токов следует эволюции *Dst*.

Рассмотрим наибольшие мелкомасштабные токи, которые наблюдаются спутником *SwB* в

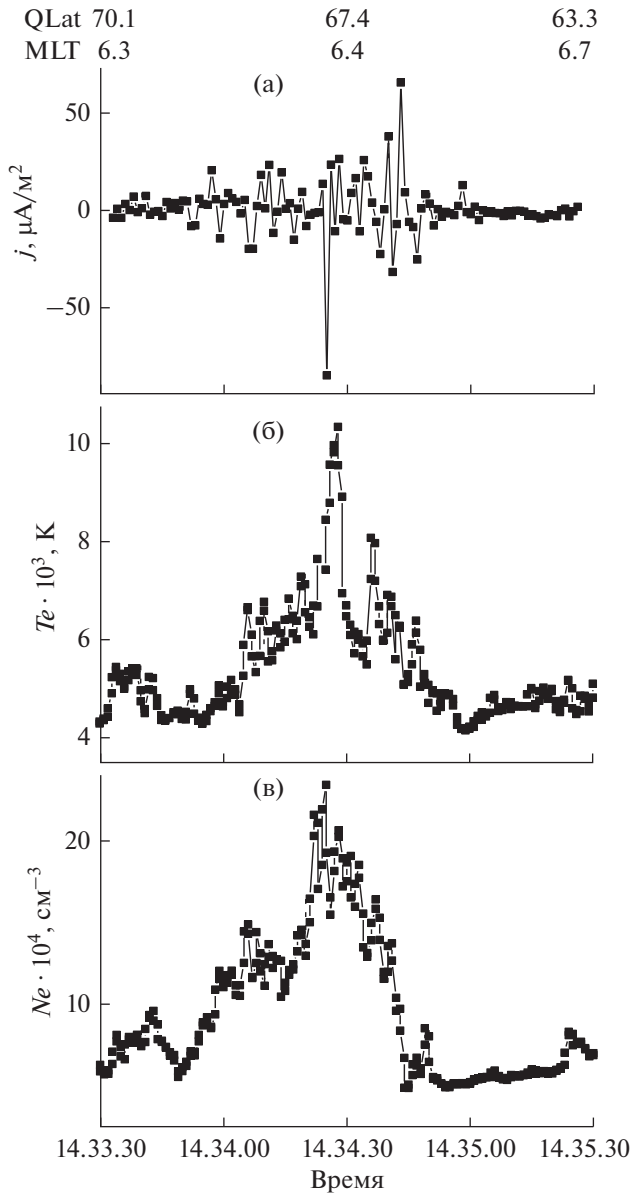


Рис. 9. 1-с значения (а) плотности ПТ, (б)  $T_e$  и (в)  $N_e$  в 14.33.30–14.35.30 UT, 17.III.2015.

~14 UT 17.III.2015, и сопровождающие их вариации параметров ионосферной плазмы. В это время *SwB* пересекает широтный диапазон  $60^\circ$ – $70^\circ$  MLat в северном полушарии с севера на юг. 1-с значения плотности ПТ и параметры плазмы (электронная плотность  $N_e$  и температура  $T_e$ ), измеренные в течение периода 14.33.30–14.35.30 UT представлены на рис. 9. В 14.34.25 UT спутник наблюдает вытекающий ПТ плотностью  $82 \mu\text{A}/\text{m}^2$ . В нескольких десятках километрах севернее наблюдается втекающий ПТ ( $66 \mu\text{A}/\text{m}^2$ ). Близко расположенные мелкомасштабные втекающие и вытекающие ПТ с сопоставимыми значениями образуют биполярную структуру, в которой токи сбалансированы и, вероятно, локально замкнуты.

Вокруг области вытекающего тока образуется узкая область повышенной электронной концентрации до  $2 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-3}$  и увеличенной до  $10^4 \text{ K}$  температуры, что примерно на 20% выше их значений в окружающей плазме. Ширина области возмущений  $N_e$  и  $T_e$  в несколько раз превышает ширину токовых структур. На экваториальной границе токовой структуры, там, где находится пик втекающего в ионосферу ПТ, наблюдается резкое понижение  $N_e$  (в 14.34.40 UT). Локальное повышение  $N_e$  и  $T_e$  и соответствующее увеличение проводимости, вероятно, обусловлены авроральными высыпаниями. Хотя без оптических данных нельзя сделать строгий вывод, наблюдаемая структура мелкомасштабных ПТ, которая сопровождается локальным увеличением  $N_e$  и  $T_e$ , вероятно, связана с мезомасштабной дискретной авроральной дугой.

## 5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Токовые системы авроральных дуг в вечернем секторе, где фоновое электрическое поле направлено на север были выявлены по наблюдениям радара некогерентного рассеяния EISCAT [15]. Было показано, что токовая система дуги состоит из втекающего в ионосферу ПТ на экваториальной стороне дуги, который замыкается ионосферным током, направленным к северу. Внутри и на приполярной кромке дуги ПТ вытекает из ионосферы. Диапазон оценок плотностей тока, полученных с помощью радарных измерений варьируется от 4 до  $40 \mu\text{A}/\text{m}^2$ . Большой разброс оценок ПТ, вероятно, связан с его различными масштабами, так как для дуг с очень резкими градиентами электронной плотности ПТ протекают в узких областях на краях дуги. Наблюдения нескольких событий с помощью спутника *FAST* показали, что плотность ПТ, связанных с дугами, составляет  $1$ – $10 \mu\text{A}/\text{m}^2$  [16, 17]. На основании наблюдений спутников *SWARM* и *THEMIS*, а также системы оптических камер ASI была выявлена связь несколько дуг полярных сияний с парами втекающих-вытекающих ПТ [18]. Для этих дуг наблюдались униполярные и многополярные системы ПТ с плотностями тока порядка нескольких  $\mu\text{A}/\text{m}^2$ . Дуги в однополярных системах FAC имеют типичную ширину  $10$ – $20 \text{ km}$  и расстояние между токами  $25$ – $50 \text{ km}$ . Дуги в многополярных системах шире и еще более разделены пространственно. Наблюдения спутником *SWARM* мелкомасштабных ПТ и параметров плазмы во время бури, приведенные на рис. 9, согласуются с морфологией возмущений, которые характерны для авроральных дуг. Так, значительно повышенные значения  $T_e$  в пределах дуги и непосредственно к полюсу от дуги могут быть связаны с локальным усилением электрического поля, а локальное увеличение и уменьшение  $N_e$  — с вытекающим и втекающим ПТ. Необычно высокой оказалась измеренная *SWARM*

величина плотности ПТ, которая доходила до  $100 \mu\text{A}/\text{m}^2$ . Это существенно превышает величины ПТ на сравнимых пространственных масштабах, о которых сообщалось ранее.

Нитевидные структуры ПТ высокой плотности всегда представлены в наблюдениях *SWARM*. Это подтверждает тот факт, что токи  $R1/R2$  состоят из множества малых ПТ, которые усредняются при интегрировании по области, занятой токами. Структуры стационарных крупномасштабных ПТ обнаруживаются после надлежащего сглаживания.

Эволюция крупномасштабных ПТ во время бурь в марте 2015 г. и в сентябре 2017 г. в целом согласуется с закономерностями, наблюдавшимися ранее с помощью спутника *CHAMP* во время интенсивных геомагнитных бурь 2003 г. [5]. Общей чертой является смещение области ПТ к экватору, которое коррелирует с интенсивностью бури и связано с расширением аврорального овала. Однако, несмотря на то, что бури 2015 и 2017 гг. значительно слабее ( $Dst \sim 200$  нТл), чем бури 2003 г. ( $Dst \sim -400$  нТл), в этих событиях область ПТ расширяется на более низкие широты: ПТ обнаруживаются вплоть до  $50^\circ$  MLat. Для бурь 2003 г. минимальная широта экваториальных границ ПТ находилась на широте  $\sim 52^\circ$  MLat.

Взаимное расположение дневной и ночной границ ПТ соответствует конфигурации аврорального овала. На пике главной фазы магнитной бури овал в полуденном секторе смещается на несколько градусов больше, чем на ночной стороне, а во время фазы восстановления полуночный овал восстанавливается медленнее, чем дневной [19]. Анализ широтного сдвига полярной границы аврорального овала, основанный на оптических наблюдениях спутника *IMAGE* во время магнитной бури, также показал, что в фазе восстановления, когда IMF  $B_z$  поворачивает на север, дневная граница овала восстанавливается намного быстрее, чем ночная [20]. Во время рассмотренных событий экваториальные границы ПТ с высокой степенью корреляции следуют изменению  $Dst$  в том случае, если суббури происходят синхронно с развитием магнитной бури и падением  $Dst$ . Суббуревая активность определяет также скорость восстановления (смещения к полюсу) границ ПТ. Мгновенные значения широтной границы области, занятой ПТ, слабо коррелируют с  $AL$  индексом. Соотношение между сглаженными значениями  $AL$  и широтой экваториальной границы ПТ остается постоянным независимо от величины  $Dst$ .

В марте 2015 г. в течение всего периода бури дневная граница расположена на несколько градусов ближе к полюсу, чем ночная. В сентябре 2017 г. в главную фазу наблюдается та же тенденция, но в восстановительную фазу бури ночная и дневная границы, смещаясь к полюсу, находятся практически на одной и той же широте. Различия

в динамике границ во время двух рассмотренных бурь связаны с различным характером суббуревой активности, которая в первом случае продолжается в фазе восстановления, а во втором быстро затухает. Релаксация на ночной стороне не демонстрирует заметной временной задержки по сравнению с поведением дневной границы (или возможно эффект не обнаруживается из-за конфигурации орбит *SWARM*).

Эволюция плотностей ПТ в целом следует тем же тенденциям, что и их широтное положение. В главную фазу бури ПТ усиливаются более чем на порядок, достигая в среднем  $3-4 \mu\text{A}/\text{m}^2$  на ночной и  $2 \mu\text{A}/\text{m}^2$  на дневной стороне. В том случае, когда пик  $AE(AL)$  индекса не совпадает с пиком  $Dst$ , максимум плотностей тока достигается во время интенсификации суббуревой активности. Ночные ПТ незамедлительно реагируют на начало суббури. Эта зависимость сглаживается по мере перехода к предполуденным часам местного времени. Таким образом, интенсивность ПТ, как крупномасштабных  $R1/R2$ , так и мелкомасштабных  $\sim 10$  км наиболее эффективно контролируется динамикой суббури, которыми сопровождается магнитная буря.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены характеристики ПТ по наблюдений спутников *SWARM* во время двух магнитных бурь 16–19.III.2015 и 6–9.IX.2017. Бури сопровождались суббуриями большой интенсивности, причем в первом случае усиление суббуревой активности предшествовало максимуму  $Dst$ , а во втором – пики суббури и  $Dst$  практически совпадали. Спутники пересекали вечерний, полуденный, пред- и после полуночный секторы MLT.

Найдены следующие особенности эволюции ПТ.

Изменения плотности ПТ и широтного положения экваториальных границ области, занимаемой ПТ, контролируются развитием бури и в значительной степени – суббуревой активностью. В том случае, когда пик  $AE(AL)$  индекса не совпадает с пиком  $Dst$ , максимум плотностей тока достигается во время интенсификации суббуревой активности. На пике суббури плотности втекающих и вытекающих ПТ, усредненные по траектории в пределах заданного сектора MLT, достигают  $3-4 \mu\text{A}/\text{m}^2$ , в то время как уровень в невозмущенном состоянии составляет около  $0.1-0.2 \mu\text{A}/\text{m}^2$ .

Смещение области ПТ к экватору коррелирует с интенсивностью бури и следует изменению как  $Dst$ , так и  $AL$  индексов. Минимальная широта экваториальных границ ПТ ограничена  $50^\circ$  MLat для обеих бурь. Смещение экваториальной границы ПТ происходит более плавно по сравнению с изменениями авроральных магнитных индексов.

Крупномасштабные ПТ  $R1/R2$  состоят из мелкомасштабных нитевидных структур с высокой плотностью тока, которые всегда присутствуют в наблюдениях *SWARM*. Мелкомасштабные ( $\sim 10$  км) токи с плотностью до  $100 \mu\text{A}/\text{m}^2$  появляются в периоды общего повышения плотности в главную фазу бури во время активации суббурь. Локальные повышения концентрации и температуры электронов, показывают, что токовая структура может быть связана с мезомасштабной дискретной авроральной дугой.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Iijima T., Potemra T.A.* The amplitude distribution of field-aligned currents at northern high latitudes observed by Triad // *J. Geophys. Res.* 1976. V. 81. № 13. P. 2165–2174.  
<https://doi.org/10.1029/JA081i013p02165>
2. *Lui A.T.Y.* Current disruption in the Earth's magnetosphere: Observations and models // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101. P. 13067–13088.
3. *Weimer D.R.* Maps of ionospheric field-aligned currents as a function of the interplanetary magnetic field derived from Dynamics Explorer 2 data // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. P. 2889–12902.
4. *Papitashvili V.O., Christiansen F., Neubert T.* A new model of field-aligned currents derived from high-precision satellite magnetic field data // *Geophys. Res. Lett.* 2002. V. 29. № 14. P. 1683.  
<https://doi.org/10.1029/2001GL014207>
5. *Wang H., Luhr H., Ma S.Y. et al.* Field-aligned currents observed by *CHAMP* during the intense 2003 geomagnetic storm events // *Ann. Geophys.* 2006. V. 24. P. 311–324. SRef-ID:1432-0576/ag/2006-24-311
6. *Anderson B.J., Korth H.* Saturation of global field aligned currents observed during storms by the Iridium satellite constellation // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2007. V. 69. P. 166–169.
7. *Lukianova R., Hanuise C., Christiansen F.* Asymmetric distribution of the ionospheric electric potential in the opposite hemispheres as inferred from the SuperDARN observations and FAC-based convection model // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2008. V. 70. P. 2324–2335.  
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2008.05.015>
8. *Neubert T., Christiansen F.* Small-scale, field-aligned currents at the top-side ionosphere // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30. № 19. P. 2010.  
<https://doi.org/10.1029/2003GL017808>
9. *Dunlop M.W., Yang Y.-Y., Yang J.-Y. et al.* Multispacecraft current estimates at *Swarm* // *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2015. V. 120.  
<https://doi.org/10.1002/2015JA021707>
10. *Juusola L., Kauristie K., Vanhamaki H. et al.* Comparison of auroral ionospheric and field-aligned currents derived from *Swarm* and ground magnetic field measurements // *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2016. V. 121. P. 9256–9283.  
<https://doi.org/10.1002/2016JA022961>
11. *McGranaghan R.M., Mannucci A.J., Forsyth C.* A comprehensive analysis of multiscale field-aligned currents: Characteristics, controlling parameters, and relationships // *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2017. V. 122. P. 11931–11960.  
<https://doi.org/10.1002/2017JA024742>
12. *Ritter P., Lühr H.* Curl-B technique applied to *Swarm* constellation for determining field-aligned currents // *Earth Planets Space.* 2006. V. 58. № 4. P. 463–476.
13. *SWARM Level 2 Processing System Consortium.* Detailed Processing Model (DPM) FAC (Tech. Rep. SW-DS-GFZ-GS-0002): *Swarm Level 2 Processing System*, 2012.
14. *Milan S.E., Cowley W.H., Lester M. et al.* Response of the magnetotail to changes in the open flux content of the magnetosphere // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109.  
<https://doi.org/10.1029/2003JA010350>
15. *Aikio A.T., Lakkala T., Kozlovsky A., Williams P.J.S.* Electric fields and currents of stable drifting auroral arcs in the evening sector // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. A12. P. 1424.  
<https://doi.org/10.1029/2001JA009172>
16. *Elphic R.C., Bonnell J.W., Strangeway R.J. et al.* The auroral current circuit and field-aligned currents observed by *FAST* // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25. P. 2033–2036.
17. *Janhunen P., Olsson A., Amm O., Kauristie K.* Characteristics of a stable arc based on *FAST* and *MIRACLE* observations // *Ann. Geophys.* 2000. V. 18. P. 152–160.
18. *Wu J., Knudsen D.J., Gillies D.M. et al.* *Swarm* Observation of Field-Aligned Currents Associated With Multiple Auroral Arc Systems // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2017. V. 122. P. 10145–10156.  
<https://doi.org/10.1002/2017JA024439>
19. *Meng C.I.* Dynamic Variation of the Auroral Oval During Intense Magnetic Storms // *J. Geophys. Res.* 1984. V. 89. P. 227–235.
20. *Lukianova R., Kozlovsky A.* Dynamics of polar boundary of the auroral oval derived from the *IMAGE* satellite data // *Cosmic Res.* 2013. V. 51. V. 1. P. 46–53.