

УДК 550.385

## НАЗЕМНЫЕ И СПУТНИКОВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ SAR-ДУГИ В ВЕЧЕРНЕМ СЕКТОРЕ MLT В НАЧАЛЕ МАГНИТНОЙ БУРИ 17 МАРТА 2015 г.

© 2020 г. И. Б. Иевенко<sup>1</sup>, \*, С. Г. Парников<sup>1</sup>, \*\*<sup>1</sup>Институт космических исследований и аэронауки  
им. Ю.Г. Шафера СО РАН (ИКФИА СО РАН), г. Якутск, Россия

\*e-mail: ievenko@ikfia.ysn.ru

\*\*e-mail: parnikov@ikfia.ysn.ru

Поступила в редакцию 31.01.2020 г.

После доработки 17.03.2020 г.

Принята к публикации 21.05.2020 г.

Стабильные авроральные красные дуги являются следствием взаимодействия энергичных ионов кольцевого тока с внешней плазмосферой (плазмопаузой). В работе анализируются результаты наблюдения стабильной авроральной красной дуги цифровой камерой всего неба на ст. Маймага (58° CGMLat, 202° CGMLon) с одновременной регистрацией плазмопаузы и потоков энергичных ионов на борту спутника *VanAllenProbeB* (VAP-B) в начале большой магнитной бури 17 марта 2015 г. Камера всего неба зарегистрировала интенсивную стабильную авроральную красную дугу на исправленных геомагнитных широтах 52°–59° в вечернем секторе MLT, начиная с ~11:16 UT (19:26 MLT) во время низкой авроральной активности при  $IMF_{Bz} > 0$ . По данным спутника VAP-B вблизи меридиана оптических наблюдений плазмопауза находилась на  $L \sim 3$ –4, а внутренняя граница потоков энергичных ионов  $H^+$  и  $O^+$  на  $L \sim 2.8$ –3.3. Спутник DMSP F19 измерил субавроральные пики электронной температуры в 10:14 и 11:55 UT в вечернем секторе MLT. Показано, что в этом случае стабильная авроральная красная дуга отображала проекцию вдоль магнитного поля области перекрытия вечерней выпуклости плазмосферы и потока энергичных ионов кольцевого тока после начала магнитной бури.

DOI: 10.31857/S0016794020050090

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Принято считать, что стабильные авроральные красные (SAR) дуги наблюдаются во время магнитных бурь, которые определяются по вариации геомагнитного индекса *Dst* [Rees and Akasofu, 1963; Зайцева и др., 1971; Kozyra et al., 1997]. SAR-дуги возникают вследствие перекрытия кольцевого тока с внешней плазмосферой, где потоки энергичных ионов нагревают плазмосферные электроны. Возникающий нисходящий поток сверхтепловых электронов вдоль линий магнитного поля увеличивает окружающую электронную температуру на высотах области *F2* ионосферы в виде субаврорального пика электронной температуры ( $T_e$  пика). В результате происходит усиление интенсивности красной линии атомарного кислорода в SAR-дуге, отображающей плазмопаузу [Cole, 1965, 1970; Kozyra et al., 1997]. Согласно механизму генерации SAR-дуги, предложенному Cole [1965, 1970], передача энергии от энергичных ионов кольцевого тока тепловым электронам внешней плазмосферы в результате кулоновских столкновений происходит во все времена магнитной бури. Красные дуги появляются во время главной фазы магнитной бури в

процессе развития авроральных возмущений. Обобщение Cole [1965, 1970] хорошо соответствовало имеющимся в то время наблюдениям SAR-дуг.

В то же время, после теоретической работы Cornwall et al. [1971], многие исследователи стали считать, что SAR-дуги должны возникать во время фазы восстановления бури. В этой статье считается, что во время главной фазы магнитной бури плазмопауза смещается на более низкие  $L$ -оболочки в направлении Земли. В период фазы восстановления происходит перекрытие расширяющейся плазмосферы с околоземной областью кольцевого тока, где в результате затухания Ландау ионно-циклотронных волн нагреваются холодные электроны. Поток сверхтепловых электронов вдоль магнитно-силовых линий вызывает усиление красной линии атомарного кислорода на высотах области *F2* ионосферы в виде среднеширотной красной дуги, которая отображает вновь сформированную границу плазмосферы (плазмопаузу).

Однако спутниковые исследования, проведенные в период 1980–1990 г., иногда указывали на то, что энергичные частицы кольцевого тока проникают во внешнюю плазмосферу во время глав-

ной фазы магнитной бури и/или во время отдельных суббурь [Kozuza et al., 1997]. Результаты синхронных измерений на спутниках DE1 и DE2 в области плазмосферы и на ионосферных высотах, соответственно, ясно показали, что субавроральные пики электронной температуры или SAR-дуги могут наблюдаться на широтах проекции радиального градиента плотности холодной плазмы внутри плазмосферы [Hogwitz et al., 1986]. Недавно опубликованные результаты наблюдений SAR-дуг с помощью цифровых камер всего неба (*All-sky imagers*) также указывают на проникновение энергичных ионов кольцевого тока во внешнюю плазмосферу в начале главной фазы магнитной бури [Shiokawa et al., 2013; Mendillo et al., 2016].

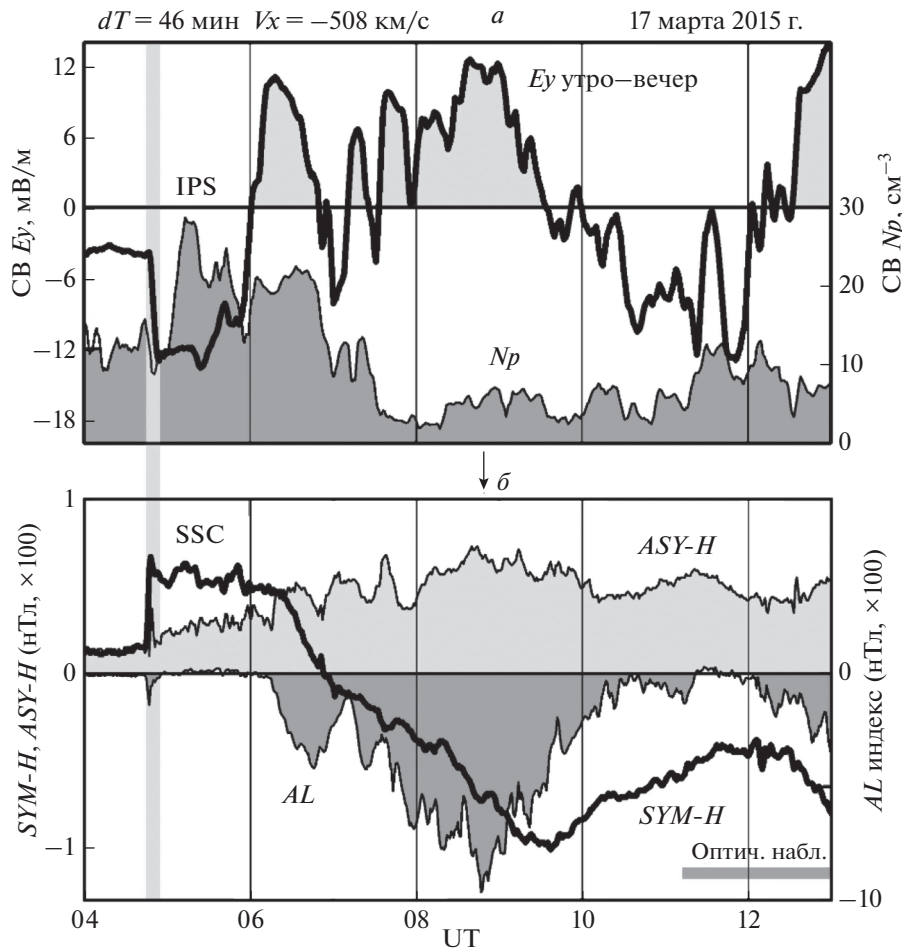
Фотометрические наблюдения динамики диффузного сияния и SAR-дуги в эмиссиях 557.7 и 630.0 нм на меридиане Якутска (62° N, 130° E) во время изолированных суббурь были детально рассмотрены в работах Иевенко [1993, 1995, 1999]. Известно, что диффузное сияние (ДС) вызвано высыпанием низкоэнергичных электронов из околосферного плазменного слоя [Fairfield and Vinas, 1984; Feldstein and Galperin, 1985]. Наши исследования показывают, что SAR-дуга появляется и/или уярчается во время фазы расширения суббури. Образование SAR-дуги начинается в области экваториальной границы ДС. Во время фазы восстановления интенсивных суббурь на широтах SAR-дуги обычно наблюдаются пульсации свечения в эмиссии 427.8 нм  $N_2^+$ , обусловленные пульсирующими высыпаниями энергичных частиц. В случае длительной суббуревой активности SAR-дуга отделяется от ДС и движется в экваториальном направлении [Иевенко и Алексеев, 2004; Ievenko et al., 2008]. В работе Ievenko and Parnikov [2014] представлено наблюдение ДС и SAR-дуги с использованием цифровой камеры всего неба на меридиане Якутска во время изолированной инъекции суббури 13 февраля 2013 г., зарегистрированной на борту спутника VAP-A.

Целью данной работы является анализ события регистрации SAR-дуги во время спутниковых измерений параметров плазмы и потоков энергичных частиц в ионосфере и внутренней магнитосфере вблизи меридиана Якутска. В статье мы впервые делаем сопоставление наземных наблюдений интенсивной SAR-дуги цифровой камерой всего неба с данными одновременных измерений плазмопаузы и потоков энергичных ионов на борту спутника VAP-B в начале большой магнитной бури 17 марта 2015 г. Наблюдения SAR-дуги также сравниваются с измерением субавроральных пиков электронной температуры спутником DMSP F19 в вечернем секторе MLT.

## 2. МЕТОДЫ НАБЛЮДЕНИЙ И АНАЛИЗА ДАННЫХ

Динамика субаврорального свечения во время суббурь и бурь изучалась на оптической станции Маймага (63° N, 130° E) с исправленными геомагнитными координатами 58° CGMLat и 202° CGMLon для эпохи 2015 г. Станция располагается на 1 градус широты севернее г. Якутска (62° N, 130° E) на одном географическом меридиане. Полночь по магнитному локальному времени (MLT) на этом меридиане наблюдается в ~15:50 UT. Наблюдение сияний и SAR-дуг выполняется спектрофотометрами и цифровой камерой всего неба ASI (*All-sky imager*) “*Keo Sentry*” производства фирмы “*Keo Scientific Ltd*”. ASI оснащен CCD (*Charge-coupled device*) камерой *PI Acton ProEM 1024B* и пятью полостными интерференционными фильтрами с полушириной полосы пропускания 2.0 нм. Фильтры диаметром 3 дюйма центрированы на длины волн 557.7 и 630.0 [ОЛ, 470.9 ( $N_2^+$ ), 486.1 (H $\beta$ ), 620.0 (континуум), 480.0 (континуум) нм. Высокая чувствительность CCD камеры с умножителем электронов (EM) позволяет детально изучать широтную и долготную динамику формирования SAR-дуг, а также электронных и протонных сияний. Для анализа данные ASI представлены в этой работе в виде обработанных изображений в проекции на поверхность Земли для высот свечения 110 км для ДС и 450 км для SAR-дуги в эмиссиях 557.7 и 630.0 нм, соответственно. Проекция изображений всего неба были построены в исправленных геомагнитных координатах (CGMLat и CGMLon) на основе моделей геомагнитного поля *DGRF/IGRF* (<https://omniweb.sci.gsfc.nasa.gov/vitmo/cgm.html>).

Наземные оптические наблюдения SAR-дуги были сопоставлены с потоками энергичных ионов с использованием данных измерений инструментами ECT (*Energetic Particle, Composition, and Thermal Plasma Suite*) HOPE (*Helium Oxygen Proton Electron*), усредненных по пич углам, на борту спутника VAP-B (или RBSP-B). Местоположение плазмопаузы было получено по градиенту плотности холодных электронов, который также определяется по различным измерениям на спутнике VAP-B. Для идентификации интервала времени, когда магнитосферная конвекция усиливается, используются данные регистрации параметров солнечного ветра (СВ) с космического аппарата DSCOVR. Интервал времени фазы развития суббури был определен с помощью магнитограмм на низкоширотных станциях. Согласно Сергееву и Цыганенко [1980], Rostoker et al. [1980] бухтообразные вариации *H*- и *D*-компонент на долготной цепочке низкоширотных станций могут дать информацию о начале фазы развития суббури, происходящей в любом секторе местного времени.



**Рис. 1.** Динамика солнечного ветра и магнитные возмущения в начале бури 17 марта 2015 г. (а) – электрическое поле  $E_y$  и плотность солнечного ветра  $N_p$  со сдвигом  $dT$ ; (б) – магнитные индексы  $ASY-H$ ,  $SYM-H$  и  $AL$ . Стрелкой указано начало фазы развития суббури, подробности в тексте. На панели (б) показан интервал времени оптических наблюдений.

### 3. НАЧАЛО МАГНИТНОЙ БУРИ И НАБЛЮДЕНИЕ SAR-ДУГИ НА МЕРИДИАНЕ ЯКУТСКА

Магнитная буря 17 марта 2015 г. имела внезапное начало с SSC в 04:46 UT, вызванное межпланетной ударной волной (IPS на рис. 1а). Главная фаза магнитной бури началась в ~06:24 UT после резкого увеличения электрического поля  $E_y$  утро-вечер ( $-V_x \times B_z$ ) до 11 мВ/м при высокой плотности солнечного ветра. Во время больших значений  $E_y$  утро-вечер произошло уменьшение индекса  $SYM-H$  до ~-100 нТл. В это же время был значительный рост  $AL$ -индекса, который достиг -900 нТл во время суббури, фаза развития которой началась в предполуденном секторе MLT по магнитным вариациям на низкоширотной ст. Honolulu (21° CGMLat, 270° CGMLon; на рис. 1б не приведены). Начало фазы развития суббури на рис. 1 показано стрелкой. Во время отрицательного  $E_y$  магнитная активность значительно

уменьшилась, по  $AL$ -индексу до спокойного уровня. Вторая активизация главной фазы магнитной бури началась во время следующего значительного и длительного увеличения  $E_y$  утро-вечер после ~12:30 UT.

Оптические наблюдения на меридиане Якутска начались в 11:16 UT во время низкой авроральной активности при значении индекса  $SYM-H \sim -50-40$  нТл. Рисунок 2 показывает обработанные изображения всего неба в эмиссиях 630.0 и 557.7 нм в интервале времени от начала наблюдений до ~12:30 UT (19:25–20:40 MLT). Видно, что исправленная геомагнитная широта полярной границы и интенсивность SAR-дуги увеличивалась с востока на запад. Экваториальная граница дуги наблюдалась на CGMLat ~52°–53° по всему небу. Широта экваториальной границы диффузного сияния (ДС) в эмиссиях 557.7 и 630.0 нм также увеличивалась в западном направлении. Граница ДС совпадала, вероятно, с поляр-

ной границей красной дуги на CGMLat  $\sim 59^\circ$ – $60^\circ$  на западном горизонте. Интенсивность красной дуги в максимуме на западе уменьшилась от  $\sim 2$  в начале до  $\sim 1.3$  кРл в конце приведенного интервала времени наблюдений. Диффузное сияние в эмиссии 557.7 нм на севере усилилось до  $\sim 25$  кРл в  $\sim 12:30$  UT во время нового роста  $E_u$  утро–вечер (смотри рис. 1а). Далее, после  $\sim 13$  UT, ДС быстро расширялось к экватору. SAR-дуга, вероятно, также смещалась на более низкие широты. В этой статье данные этих наблюдений не рассматриваются.

#### 4. ИЗМЕРЕНИЯ СПУТНИКА VAP-B В МАГНИТОСФЕРЕ ВО ВРЕМЯ НАБЛЮДЕНИЙ SAR-ДУГИ

На рисунке 3 показана орбита спутника VAP-B в плоскости  $X$ ,  $Y$  GSM во время оптических наблюдений 17 марта 2015 г. в вечернем секторе MLT. Спутник регистрировал границу плазмосферы (плазмопаузу) и потоки энергичных частиц в секторе 17:36–19:08 MLT вблизи меридиана Якутска в 12:10–12:50 UT. Прохождение VAP-B через плазмопаузу в вечернем секторе MLT показано серой жирной линией.

Рисунок 4а показывает положение внутренней границы потоков энергичных ионов относительно плазмопаузы. Измерения VAP-B указывают на перекрытие энергичных ионов кольцевого тока  $O^+$  и  $H^+$  с внешней плазмосферой в интервале  $L \sim 2.8$ – $4.5$  по расчетным координатам на рис. 4в. Резкое увеличение потока электронов в интервале энергий 1–7.4 кэВ на рис. 4б совпадает с началом роста плотности холодных электронов. Этот рост потока низко энергичных электронов, вероятно, связан с внутренней границей плазменного слоя. На рисунке 4 темно-серый столбик показывает область перекрытия тепловой и энергичной плазмы, которая может быть сопряжена с наблюдаемой SAR-дугой в это время. Спутник прошел внутреннюю и внешнюю границы этой области в 12:10 UT на меридиане 17:36 MLT с параметром  $L \sim 2.8$  и в 12:45 UT на меридиане 19:00 MLT с  $L \sim 4.0$ , соответственно.

Обработанные изображения всего неба с регистрацией SAR-дуги на меридиане Якутска в начале и конце прохода VAP-B области перекрытия энергичных ионов с плазмопаузой представлены на рис. 5. Изображения показывают свечение с интенсивностью менее 2000 Рэлей (2 кРл) для лучшего отображения SAR-дуги. На изображении в 12:10 UT черными кружками показана экваториальная граница красной дуги с уровнем интенсивности  $\sim 0.9$  кРл. Граница с постоянной CGMLat  $\sim 53^\circ$  пересекает на западном горизонте геомагнитный меридиан  $\sim 180^\circ$  в 18:52 MLT со значением  $L \sim 2.8$  (см. рис. 5). Постоянная широта экваториальной границы дуги может быть обу-

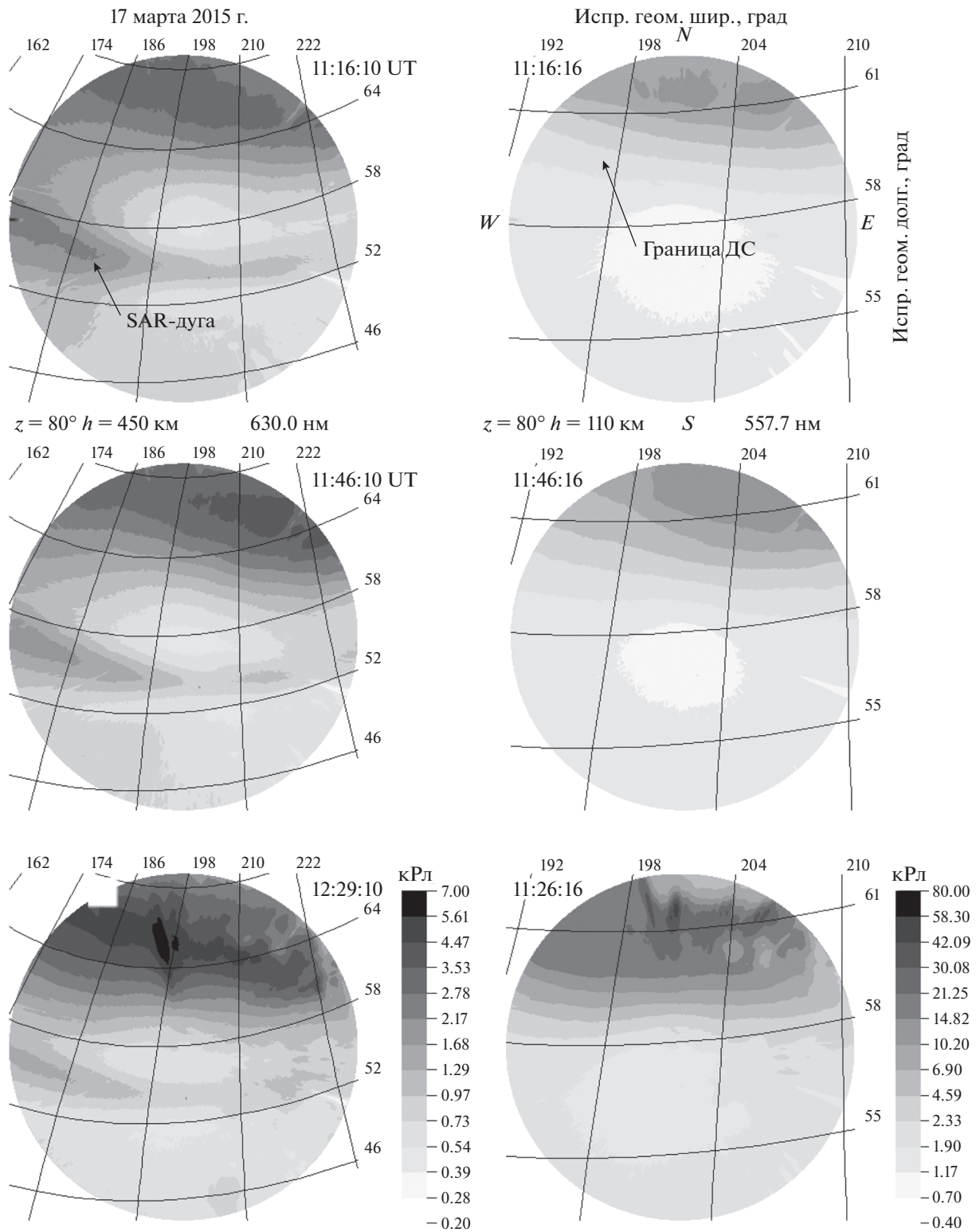
словлена резким уменьшением потока ионов  $O^+$  и  $H^+$  с энергией 20 кэВ на оболочке  $L \sim 2.8$  по измерениям VAP-B на меридиане 17:36 MLT (см. рис. 4а). Следует отметить, что поток энергичных ионов  $O^+$  в этой области в  $\sim 1.8$  раза превышал поток энергичных протонов.

Полярная граница SAR-дуги с уровнем интенсивности  $\sim 1$  кРл показана белыми кружками на изображении в 12:45 UT на рис. 5. На западном горизонте полярная граница дуги на широте CGMLat  $\sim 59.5^\circ$  определена по изображению в 12:10 UT. На геомагнитном меридиане  $\sim 174^\circ$  полярная граница дуги имела координаты  $L \sim 3.9$  и 19:05 MLT, которые близки к положению внешней границы области перекрытия энергичных ионов с плазмопаузой по измерениям VAP-B на рис. 4 ( $L \sim 4.0$ ; 19:00 MLT). Следовательно, полярная граница SAR-дуги на меридиане  $\sim 174^\circ$  отображала границу плазмосферы с резким уменьшением электронной плотности до  $100 \text{ см}^{-3}$  и меньше. Значительное увеличение широты полярного края SAR-дуги в западном направлении могло быть обусловлено ростом расстояния от Земли до границы плазмосферы в секторе вечерней выпуклости.

#### 5. ИЗМЕРЕНИЯ DMSP F19 В ИОНОСФЕРЕ ВО ВРЕМЯ НАБЛЮДЕНИЙ SAR-ДУГИ

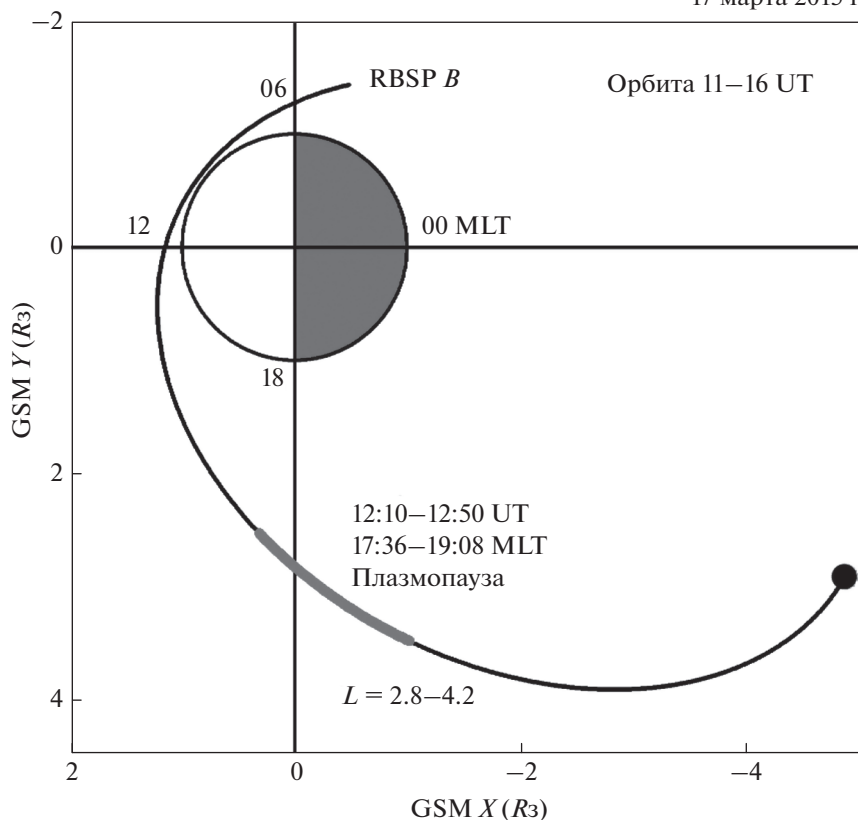
Далее, мы рассмотрим измерения электронной температуры и ионосферного дрейфа на спутнике DMSP F19 в раннем вечернем секторе MLT для верификации наземных наблюдений SAR-дуги на меридиане Якутска. На рисунке 6 показаны два прохода спутника с регистрацией субавроральных  $Te$  пиков в исправленных геомагнитных координатах. В первом проходе DMSP F19 измерил широкий  $Te$  пик в  $\sim 10:12$  UT в вечернем секторе MLT до начала оптических наблюдений на меридиане Якутска. В  $\sim 11:54$  UT F19 зарегистрировал широкий  $Te$  пик во время наземных наблюдений SAR-дуги.

Рисунок 7 показывает, что экваториальная граница  $Te$  пиков располагалась на CGMLat  $\sim 53.1^\circ$  и  $\sim 52.2^\circ$  в  $\sim 17:28$  и  $17:48$  MLT в первом и втором проходах DMSP F19, соответственно. Полярная граница  $Te$  пиков находилась на CGMLat  $\sim 60^\circ$ – $60.5^\circ$  и перекрывалась с экваториальным краем широкой полосы ионосферного дрейфа к западу или субаврорального поляризованного потока (SAPS) [Foster and Vo, 2002]. Теперь сопоставим измерения субаврорального  $Te$  пика на DMSP F19 в  $\sim 11:54$  UT с регистрацией SAR-дуги в 11:46 и 12:10 UT на рис. 2 и 5, соответственно. Спутник F19 измерил субавроральный  $Te$  пик на высоте  $\sim 850$  км, а максимум интенсивности эмиссии 630.0 нм в SAR-дуге при обработке был принят равным 450 км. Для сопоставления спутниковых измерений температуры электронов с



**Рис. 2.** Изображения всего неба в эмиссиях 630.0 и 557.7 нм в начале наблюдений 17 марта 2015 г. Проекция на поверхность Земли в исправленных геомагнитных координатах для высот свечения 450 и 110 км в красной и зеленой линиях, соответственно. Шкалы интенсивности эмиссий в градациях серого приведены в килоэрелях (кРл).

17 марта 2015 г.



**Рис. 3.** Орбита RBSP-B в плоскости  $X, Y$  GSM во время оптических наблюдений на меридиане Якутска 17 марта 2015 г. Прохождение зонда B через плазмопаузу в вечернем секторе MLT обозначено серой толстой линией.

SAR-дугой в этой работе исправленная геомагнитная широта экваториальной и полярной границы  $Te$  пика определялась на принятой высоте максимума свечения дуги с учетом наклона вектора геомагнитного поля.

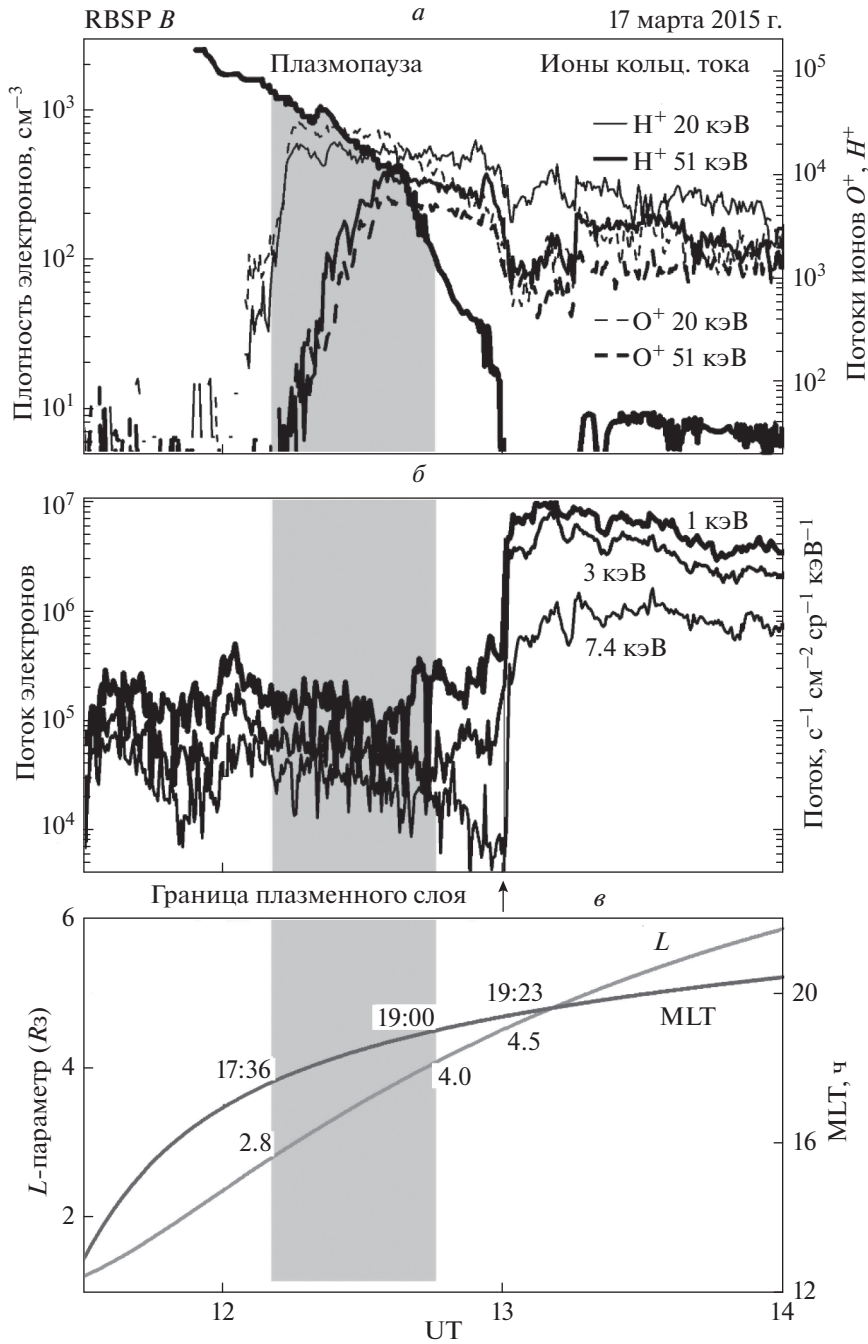
На двух изображениях в эмиссии 630.0 нм в 11:46 и 12:10 UT можно видеть, что экваториальная граница SAR-дуги на западном горизонте (крае) по уровню интенсивности  $\sim 0.7$  кРл находилась на CGMLat  $\sim 52^\circ$  в  $\sim 18:28$  и  $\sim 18:52$  MLT, соответственно. Полярную границу красной дуги на этих изображениях можно идентифицировать на CGMLat  $59^\circ$ – $60^\circ$  на геомагнитном меридиане  $\sim 174^\circ$ . Таким образом, ширина SAR-дуги  $\sim 8^\circ$  широты и положение ее границ на западном горизонте двух изображений всего неба хорошо соответствуют измерениям интенсивного  $Te$  пика в  $\sim 11:54$  UT спутником DMSP F19 на  $\sim 1$  час MLT к западу. Измерения DMSP F19 надежно верифицируют наземные наблюдения SAR-дуги.

## 6. ОБСУЖДЕНИЕ

В разделах 3–5 мы выполнили анализ наблюдений SAR-дуги на меридиане Якутска в вечернем секторе MLT через  $\sim 5$  ч после первого начала

главной фазы большой магнитной бури 17 марта 2015 г. Красная дуга наблюдалась во время низкой авроральной активности, затухания кольцевого тока и отрицательного  $E_y$  солнечного ветра. Медленное изменение интенсивности и положения SAR-дуги в течение  $\sim 1.5$  ч дали возможность выполнить корректное сопоставление наземных наблюдений со спутниковыми измерениями параметров плазмы и потоков энергичных частиц в магнитосфере и ионосфере.

Измерения VAP-B на рис. 4 показали, что широта экваториальной границы дуги была связана с резким уменьшением потока ионов  $O^+$  и  $H^+$  с энергией 20 кэВ на  $L \sim 2.8$  внутри плазмопаузы с плотностью электронов  $\sim 10^3$  см $^{-3}$ . Поток энергичных ионов  $O^+$  в этой области был в  $\sim 1.8$  раза больше потока энергичных протонов. В этом событии, вероятно, нагрев электронов области SAR-дуги обеспечивался в основном потоком энергичных ионов  $O^+$  кольцевого тока. Аналогичные события были рассмотрены в раннем исследовании Kozyra et al. [1987] по данным измерений на спутниках DE 1 и DE 2. Полярная граница SAR-дуги отображала границу плазмосферы с



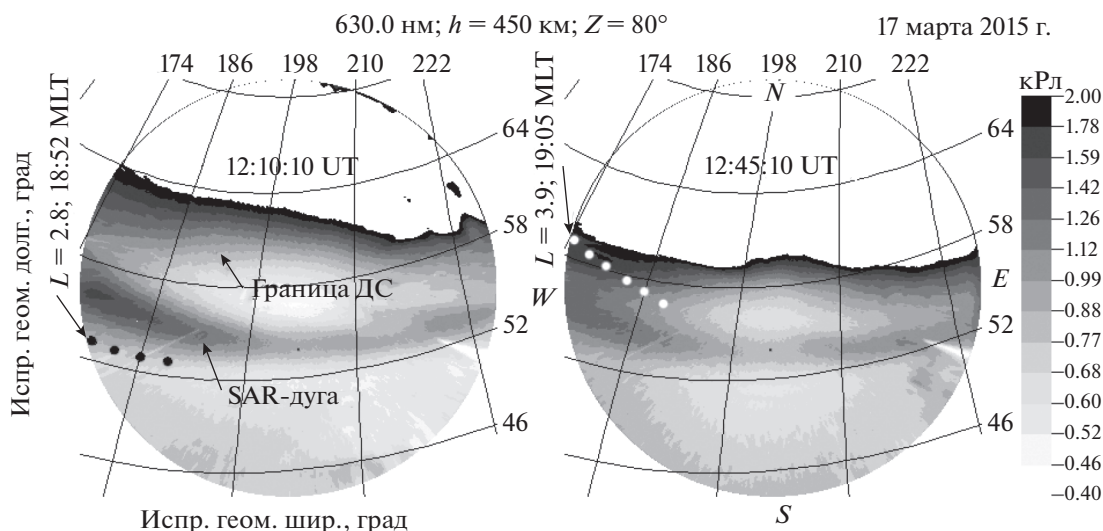
**Рис. 4.** Регистрация плазмопаузы и потоков энергичных частиц на борту RBSP-B во время наблюдения SAR-дуги 17 марта 2015 г. (а) – плотность тепловых электронов и потоки энергичных протонов и ионов кислорода; (б) – поток низко энергичных электронов; (в) – Расчетные L-параметр и MLT спутника.

резким уменьшением электронной плотности до 100 см<sup>-3</sup> и меньше согласно измерениям VAP-B.

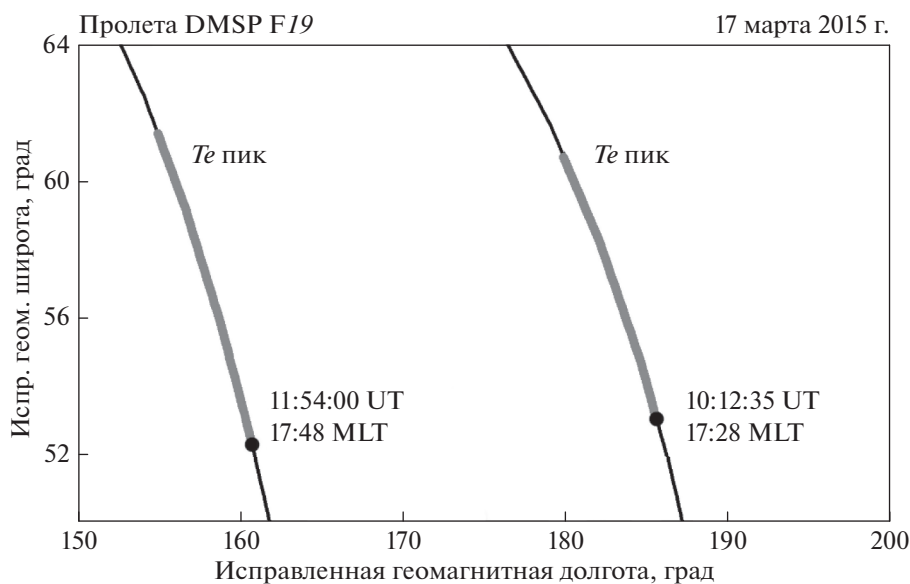
Измерения электронной температуры на спутнике DMSP F19 в двух проходах в раннем вечернем секторе MLT на рис. 7 верифицируют наземные наблюдения SAR-дуги на меридиане Якутска. Ширина SAR-дуги ~8° широты и положение

ее границ на западном горизонте изображений всего неба хорошо соответствуют одновременным измерениям интенсивного субаврорального Te пика на борту DMSP F19 западнее на ~1 ч MLT. Полярная граница Te пика перекрывалась с экваториальным краем субаврорального поляризационного потока (SAPS) [Foster and Vo, 2002].





**Рис. 5.** Изображения всего неба в эмиссии 630.0 нм во время прохождения RBSP-B плазмосферы 17 марта 2015 г. Представлены проекции на поверхность Земли для высоты свечения 450 км ( $Z \leq 80^\circ$ ) в исправленных геомагнитных координатах. Изображения показывают свечение с интенсивностью менее 2000 Рэлей для лучшего отображения SAR-дуги. Шкала интенсивности излучения в градациях серого приведена в килорэляях (кРл).



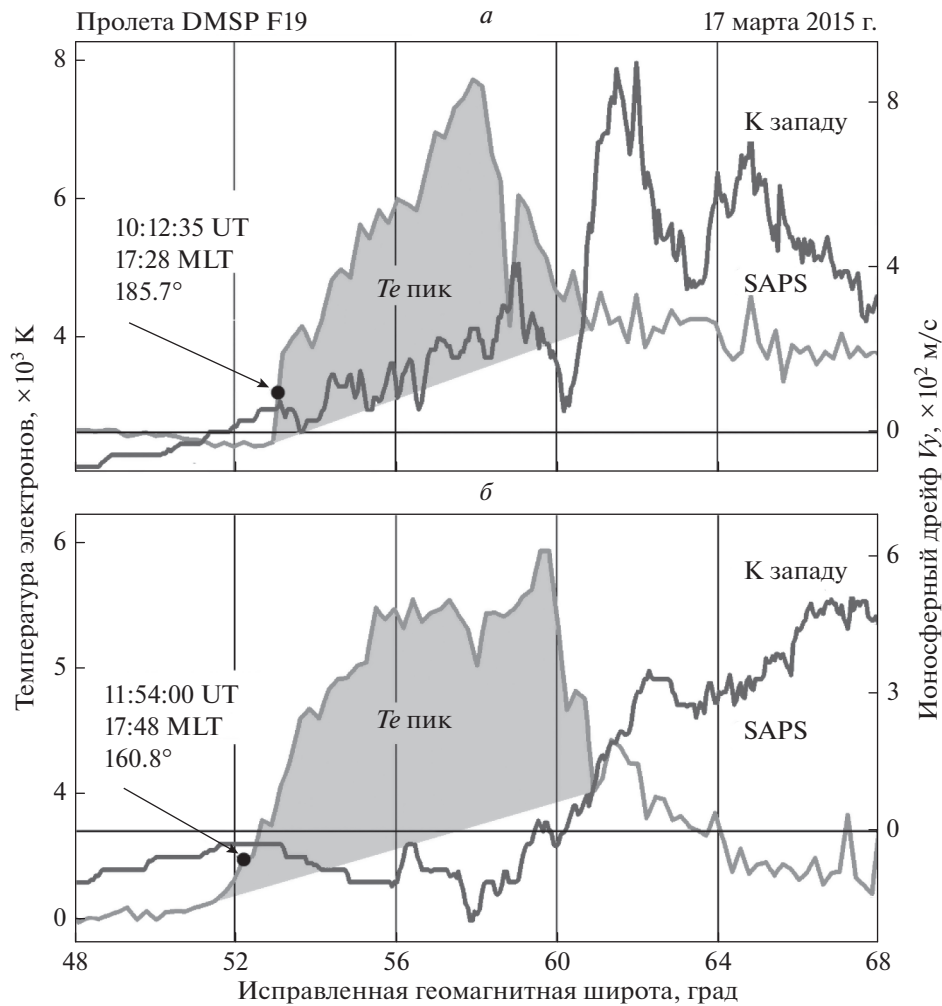
**Рис. 6.** Проходы DMSP F19 в вечернем секторе MLT до и во время регистрации SAR-дуги на меридиане Якутска. Приведены участки орбиты спутника с регистрацией субавторальных пиков электронной температуры ( $T_e$  пиков) в исправленных геомагнитных координатах.  $T_e$  пики показаны толстой серой линией. Жирной точкой показано положение экваториальной границы  $T_e$  пиков с указанием времени UT и MLT.

Наблюдение перекрытия SAR-дуги с экваториальной областью SAPS было показано в нашем исследовании Ievenko et al. [2009].

Увеличение широты полярного края SAR-дуги в западном направлении вероятнее всего обусловлено ростом расстояния от Земли до границы плазмосферы в секторе вечерней выпуклости. Рисунок 8 показывает сечение плазмосферы по

границе  $He^+$  в магнитной экваториальной плоскости по данным измерений IMAGE EUV 2 июня 2001 г. в 16:03 UT из работы Goldstein et al. [2003]. Граница плазмосферы в вечернем секторе MLT находится на  $L > 5$ , потому что измерения были сделаны при низкой геомагнитной активности ( $Kp = 2$ ). На рисунке темным серым цветом показана возможная область перекрытия внешней





**Рис. 7.** Регистрация *Te* пиков на спутнике DMSP F19 до и во время наблюдения SAR-дуги на меридиане Якутска. Приведены широтные распределения электронной температуры *Te* и скорости горизонтального дрейфа плазмы *V<sub>d</sub>* по измерениям SSIES инструментов для двух проходов F19. Жирной точкой на кривых электронной температуры показано положение экваториальной границы *Te* пика с указанием магнитной долготы и MLT.

плазмосферы с кольцевым током в секторе ~19–22 MLT, который соответствует сектору MLT наблюдения SAR-дуги в событии 17 марта 2015 г. на рис. 5. Можно видеть, что проекция области перекрытия вдоль магнитного поля в *F* слой ионосферы должна быть подобна наблюдаемой SAR-дуге на рис. 5. Широта проекции внешней границы области перекрытия будет увеличиваться в направлении вечера. Проекция внутренней границы этой области будет иметь постоянную широту в результате магнитного дрейфа к западу энергичных ионов кольцевого тока вдоль постоянной *L*-оболочки. Таким образом, наблюдаемая на меридиане Якутска SAR-дуга в начале бури 17 марта 2015 г. отображает вероятнее всего область перекрытия потоков энергичных ионов кольцевого тока с вечерней выпуклостью плазмосферы.

### 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты анализа наблюдений SAR-дуги на меридиане Якутска в начале большой магнитной бури 17 марта 2015 г. заключаются в следующем:

- 1) Красная дуга наблюдалась в вечернем секторе MLT во время затухания кольцевого тока при отрицательном *E<sub>у</sub>* солнечного ветра и низкой авроральной активности.
- 2) Согласно одновременным измерениям VAP-B SAR-дуга отображала область перекрытия энергичных ионов кольцевого тока с плазмопаузой. Поток ионов *O<sup>+</sup>* с энергией 20 кэВ в этой области был в ~1.8 раза больше потока энергичных протонов с такой же энергией. Вероятно, нагрев электронов области SAR-дуги в этом событии обеспечивался в основном потоком энергичных ионов *O<sup>+</sup>* кольцевого тока.

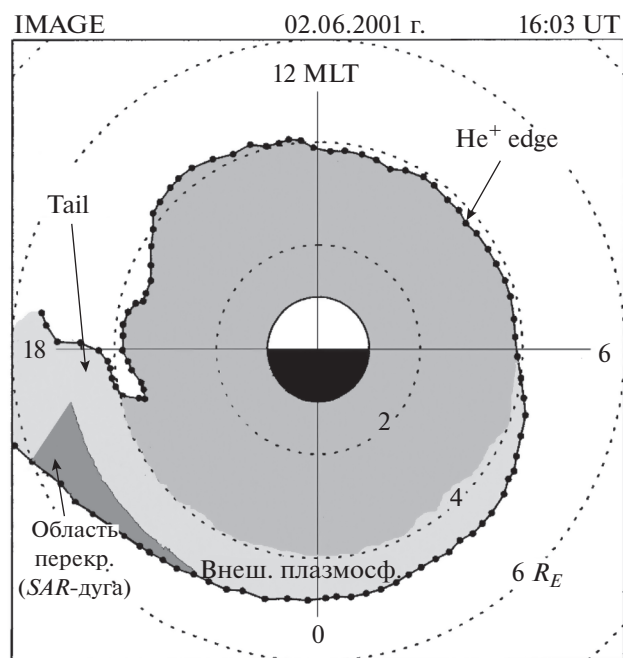


Рис. 8. Экваториальное сечение плазмосферы по границе  $\text{He}^+$  2 июня 2001 г. в 16:03 UT. Данные измерений IMAGE EUV [Goldstein et al., 2003].

3) Ширина и положение границ SAR-дуги хорошо соответствовало интенсивному  $Te$  пику по данным одновременных измерений на борту DMSP F19. Измерения электронной температуры в раннем вечернем секторе MLT верифицируют наземные наблюдения SAR-дуги на меридиане Якутска.

4) Показано, что значительное увеличение ширины SAR-дуги в направлении вечера было обусловлено конфигурацией области перекрытия кольцевого тока с вечерней выпуклостью плазмосферы в магнитной экваториальной плоскости. Полярный край красной дуги отображал границу внешней плазмосферы в вечернем секторе MLT. Экваториальный край дуги с постоянной шириной отображал внутреннюю границу потока энергичных ионов кольцевого тока на постоянной  $L$ -оболочке.

## 8. БЛАГОДАРНОСТИ

Данные по солнечному ветру и ММП спутника DSCOVR были получены в NOAA Space Weather Prediction Center (<https://www.swpc.noaa.gov/products/real-time-solar-wind>); по измерениям потоков энергичных частиц в окрестности плазмосферы на спутнике Van Allen Probe (B) в CDAWeb ([http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/istp\\_public/](http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/istp_public/)); по измерений электронной температуры и ионосферного дрейфа на спутнике DMSP F19 в Space Sciences at the University of Texas at Dallas были получены

в Madrigal database (<http://cedar.openmadrigal.org/single/>). Геомагнитные индексы были получены в WDC C2 for Geomagnetism, Kyoto (<http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html>). Исправленные геомагнитные координаты рассчитывались в NASA service (<https://omniweb.sci.gsfc.nasa.gov/vitmo/cgm.html>). Геомагнитные данные среднеширотных станций были получены на сайте INTERMAGNET (<http://www.intermagnet.org>).

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при частичной поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований 18-45-140037 p\_a.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Зайцева С.А., Пудовкин М.И., Дряхлов В.В., Дьяченко В.Н. Динамика пояса DR-токов и среднеширотные красные дуги // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 11. № 5. С. 853–859. 1971.
- Иевенко И.Б. Динамика диффузного аврорального свечения и SAR-дуги в период суббури // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 33. № 5. С. 42–57. 1993.
- Иевенко И.Б. Пульсирующие высыпания частиц в области SAR-дуги вследствие суббури // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 35. № 3. С. 37–46. 1995.
- Иевенко И.Б. Воздействие магнитосферной активности на плазмосферу по наблюдениям диффузного сияния и SAR-дуги // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 39. № 6. С. 26–32. 1999.
- Иевенко И.Б., Алексеев В.Н. Влияние суббури и бури на динамику SAR-дуги. Статистический анализ // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 44. № 5. С. 643–654. 2004.
- Сергеев В.А., Цыганенко Н.А. Магнитосфера Земли. М.: Наука, 174 с. 1980.
- Cole K.D. Stable auroral red arcs, sinks for energy of  $Dst$  Main phase // J. Geophys. Res. V. 70. № 7. P. 1689–1706. 1965.
- Cole K.D. Magnetospheric processes leading to mid-latitude auroras // Ann. Geophys. V. 26. № 1. P. 187–193. 1970.
- Cornwall J.M., Coroniti F.V., Thorne R.M. Unified theory of SAR arc formation at the plasmapause // J. Geophys. Res. V. 76. № 19. P. 4428–4445. 1971.
- Fairfield D.H., Vinas A.F. The inner edge of the plasma sheet and the diffuse aurora // J. Geophys. Res. V. 89. № A2. P. 841–854. 1984. <https://doi.org/10.1029/JA089iA02p00841>
- Feldstein Ya.I., Galperin Yu.I. The auroral luminosity structure in the high-latitude upper atmosphere: Its dynamics and relationship to the large-scale structure of the Earth's magnetosphere // Rev. Geophys. V. 23. № 3. P. 217–275. 1985. <https://doi.org/10.1029/RG023i003p00217>
- Foster J.C., Vo H.B. Average characteristics and activity dependence of the subauroral polarization stream // J. Geophys. Res. V. 107. № A12. P. 1475–1484. 2002. <https://doi.org/10.1029/2002JA009409>
- Goldstein J., Spasojevic' M., Reiff P.H., Sandel B.R., Forrester W.T., Gallagher D.L., Reinisch B.W. Identifying the

- plasmopause in IMAGE EUV data using IMAGE RPI in situ steep density gradients // *J. Geophys. Res.* V. 108. № A4. P. 1147–1160. 2003.  
<https://doi.org/10.1029/2002JA009475>
- *Horwitz J.L., Brace L.H., Comfort R.H., Chappell C.R.* Dual-spacecraft measurements of plasma-ionosphere coupling // *J. Geophys. Res.* V. 91. № A10. P. 11203–11216. 1986.
- *Ievenko I.B., Parnikov S.G., Alexeyev V.N.* Relationship of the diffuse aurora and SAR arc dynamics to substorms and storms // *Adv. Space Res.* V. 41. № 8. P. 1252–1260. 2008.  
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.07.030>
- *Ievenko I.B., Stepanov A.E., Alexeyev V.N., Smirnov V.F.* Dynamics of the convection in the inner magnetosphere by observations of the diffuse aurora, SAR arc and ionospheric drift // *Adv. Space Res.* V. 43. № 7. P. 1130–1134. 2009.  
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2008.10.003>
- *Ievenko I.B., Parnikov S.G.* Imaging the energetic particle penetration from the substorm injection region up to a plasmopause / *Proc. 10th Int. Conf. “Problems of Geocosmos”*. Russia, St. Petersburg, 6–10 October 2014. Eds: V.N. Troyan, N.Yu. Bobrov, A.A. Kostrov, A.A. Samsonov, N.A. Smirnova and T.B. Yanovskaya. St. Petersburg: Saint-Petersburg State University P. 311–315. 2014.  
[http://geo.phys.spbu.ru/materials\\_of\\_a\\_conference\\_2014/STP2014/55\\_Ievenko.pdf](http://geo.phys.spbu.ru/materials_of_a_conference_2014/STP2014/55_Ievenko.pdf)
- *Kozyra J.U., Shelly E.G., Comfort R.H., Brace L.H., Cravens T.E., Nagy A.F.* The role of ring current O<sup>+</sup> in the formation of stable auroral red arcs // *J. Geophys. Res.* V. 92. № A7. P. 7487–7502. 1987.
- *Kozyra J.U., Nagy A.F., Slater D.W.* High-altitude energy source(s) for stable auroral red arcs // *Rev. Geophys.* V. 35. № 2. P. 155–190. 1997.
- *Rees M.H., Akasofu S.* On the association between subvisual red arcs and Dst (H) decrease // *Planet. Space Sci.* V. 11. № 1. P. 105–107. 1963.  
[https://doi.org/10.1016/0032-0633\(63\)90225-3](https://doi.org/10.1016/0032-0633(63)90225-3)
- *Rostoker G., Akasofu S.I., Foster J., Greenwald R.A., Kamide Y., Kawasaki K., Lui A.T.Y., McPherron R.L., Russell C.T.* Magnetospheric substorm – Definition and signatures // *J. Geophys. Res.* V. 85. № A4. P. 1663–1668. 1980.  
<https://doi.org/10.1029/JA085iA04p01663>
- *Mendillo M., Baumgardner J., Wroten J.* SAR arcs we have seen: Evidence for variability in stable auroral red arcs // *J. Geophys. Res.: Space Physics.* V. 121. № 1. P. 245–262. 2016.  
<https://doi.org/10.1002/2015JA021722>
- *Shiokawa K., Miyoshi Y., Brandt P.C., Evans D.S., Frey H.U., Goldstein J., Yumoto K.* Ground and satellite observations of low-latitude red auroras at the initial phase of magnetic storms // *J. Geophys. Res.* V. 118. № 1. P. 256–270. 2013.  
<https://doi.org/10.1029/2012JA018001>