

СВЯЗЬ ДИНАМИКИ SAR-ДУГИ С СУББУРЕВОЙ ИНЖЕКЦИЕЙ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЙ. МАГНИТОСФЕРНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ОКРЕСТНОСТИ ПЛАЗМОПАУЗЫ

© 2022 г. И. Б. Иевенко¹, *, С. Г. Парников¹, **

¹Институт космических исследований и аэронавтики им Ю.Г. Шафера СО РАН
(ИКФИА СО РАН, ЯНЦ СО РАН), г. Якутск, Россия

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

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

Поступила в редакцию 09.07.2021 г.

После доработки 22.09.2021 г.

Принята к публикации 24.09.2021 г.

Стабильные авроральные красные дуги являются следствием взаимодействия энергичных ионов кольцевого тока с плазмопаузой. В литературе доминируют представления, что стабильные авроральные красные дуги наблюдаются во время фазы восстановления магнитных бурь. Наши предыдущие исследования субаврорального свечения на меридиане Якутска показали, что авроральные красные дуги появляются и/или уярчаются во время фазы развития суббурь. В этой работе впервые представлены результаты одновременных наблюдений камерами всего неба динамики сияний на ст. Жиганск (GMLat 62°, GMLon 196°) и формирования красной дуги на субавроральной ст. Маймага (GMLat 58°, GMLon 202°). Рассмотрено событие 15 февраля 2018 г. с минимумом $SUM-H = -20$ нТл, в котором фаза роста суббури произошла после поворота B_z ММП к югу. Фаза развития этой суббури началась в вечернем секторе 20–22 MLT с дальнейшим расширением авроральной выпуклости в послеполуночные часы MLT, где наблюдалось уярчение дуги от западного горизонта к востоку вблизи границы диффузного сияния. В это время также происходило движение на восток выступов свечения на полярном крае дуги, возникли лучи (корона) и регистрировались пульсации свечения в окрестности границы диффузного сияния в эмиссии 557.7 нм. Спутник SWARM-B зарегистрировал субавроральные пики температуры электронов на широтах авроральной красной дуги вблизи меридиана наблюдений во время фазы роста и восстановления суббури. Мы предполагаем, что в этом событии авроральная красная дуга отображала динамику перекрытия потока энергичных ионов с внешней плазмосферой как результат расширения области инжекции суббури и электрического дрейфа энергичных ионов в восточном направлении.

DOI: 10.31857/S0016794022020092

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 (плазмопаузой), 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 [Kozyra et al., 1997]. Согласно механизму генера-

ции 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 в процессе развития авроральных возмущений. Этот механизм хорошо соответствовал имеющимся в то время наблюдениям SAR-дуг.

После теоретической работы Cornwall et al. [1971], многие исследователи стали считать, что SAR-дуги должны возникать во время фазы восстановления бури. В этой работе предполагалось, 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 F_2 ионосферы в виде среднеширотной красной дуги, которая отображает вновь сформированную границу плазмосферы (плазмопаузу).

Однако спутниковые исследования, проведенные в период 1980–1990 гг., иногда указывали на то, что энергичные частицы кольцевого тока проникают во внешнюю плазмосферу во время главной фазы магнитной бури и/или во время отдельных суббурь [Horwitz et al., 1982; Kozyra et al., 1997]. Результаты синхронных измерений на спутниках DE 1 и DE 2 в области плазмосферы и на ионосферных высотах показали, что Te пик в F -области, характерный для SAR-дуги, сопряжен вдоль магнитного поля с градиентом плотности ионов и максимумом их температуры (плазмопаузой). Градиент плотности часто наблюдается внутри плазмосферы с наиболее вероятным значением $N_i = 10^3$ [Horwitz et al., 1986]. Важный результат по исследованию внутренней магнитосферы на спутниках DE 1 и DE 2 получен в работе Kozyra et al. [1987], где рассмотрено событие нагрева электронов на L -оболочках SAR-дуги (плазмопаузы) в основном потоком энергичных ионов O^+ кольцевого тока.

Недавно опубликованные результаты наблюдений SAR-дуг с помощью цифровых камер всего неба (*All-sky imagers, ASI*) 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]. В работе Martinis et al. [2019] впервые представлены результаты одновременных наблюдений SAR-дуг в магнитно-сопряженных областях двумя *ASI* во время большой магнитной бури. В этом исследовании было отмечено увеличение интенсивности дуг и скорости их экваториального движения в обоих полушариях во время фазы расширения суббурь. Это указывает на увеличение потока энергичных ионов на L -оболочках генерации SAR-дуг (плазмопаузы) как следствия суббуревой инжекции.

Наши многолетние исследования субаврорального свечения на меридиане Якутска ($62^\circ N$, $130^\circ E$) на большом количестве событий детально показали, что SAR-дуги появляются и/или уярчаются во время фазы расширения суббурь. Формирование SAR-дуги начинается в окрестности экваториальной границы диффузного сияния (ДС). Согласно результатам исследований энергичной и тепловой плазмы на спутниках DE 1 и DE 2 такая динамика SAR-дуги может быть следствием быстрого проникновения энергичных ионов и электронов ассиметричного кольцевого тока в область внешней плазмосферы. Мы впервые на-

чали исследовать пульсации свечения в эмиссиях 391.4, 427.8 и 470.9 нм N_2^+ на широтах SAR-дуги, что указывает на развитие пульсирующих высыпаний энергичных частиц в окрестности плазмопаузы. В случае длительной суббуревой активности SAR-дуга отделяется от ДС и движется в экваториальном направлении [Иевенко, 1993, 1995, 1999].

В работе Иевенко [1999] предложена эмпирическая схема воздействия магнитосферной активности на внешнюю плазмосферу, где экваториальное движение SAR-дуги после отделения от ДС отображает смещение градиента плотности холодной плазмы внутрь плазмосферы. ДС ограничивается положением плазмопаузы до начала длительной активности – остаточной плазмопаузой. Она отображается дополнительным усилением эмиссии 630.0 нм и, иногда, в виде второй SAR-дуги. На основе 700 ч спектрофотометрических наблюдений SAR-дуг на меридиане Якутска в 1989–2000 гг. в работе [Иевенко и Алексеев, 2004] была получена статистически значимая положительная связь интенсивности эмиссии 630.0 нм [OI] в дуге с кольцевым током при значениях $Dst \leq -50$ нТл. Во время слабых магнитных бурь с текущими $Dst \geq -50$ интенсивность дуги имеет значимую зависимость от геомагнитных индексов $ASY-H$, AL и Kp . Это, вероятнее всего, указывает на значительный вклад в генерацию SAR-дуги ассиметричного кольцевого тока, возникающего на фазе расширения суббурь.

Связь возникновения SAR-дуги с регистрацией инжекции энергичных частиц на геостационарной орбите во время изолированной суббури рассмотрена в работе Ievenko et al. [2008]. По данным наблюдений субаврорального свечения и ионосферного дрейфа на меридиане Якутска в работе Ievenko et al. [2009] было показано, что SAR-дуга перекрывается с экваториальным краем субаврорального поляризационного потока (SAPS) согласно [Foster and Vo, 2002]. В последних статьях мы впервые сделали сопоставление наземной регистрации SAR-дуги *ASI “Keo Sentry”* (см. раздел 2) с данными одновременных измерений параметров плазмы и потоков частиц на борту спутника Van Allen Probe B (VAP-B) в начале большой магнитной бури 17 марта 2015 г. В результате показано, что SAR-дуга в этом событии отображала область перекрытия потоков энергичных ионов кольцевого тока с плазмопаузой в вечернем секторе MLT [Иевенко и Парников, 2020; Ievenko, 2020].

Известно, что ДС вызывается высыпанием низкоэнергичных электронов из околосемного плазменного слоя (ПС). Уже при среднем уровне магнитной активности граница ПС на ночной стороне располагается вблизи плазмопаузы и, соответственно, экваториальная граница ДС может наблюдаться около ее проекции на высоты ионосферы [Horwitz et al., 1982; Fairfield and Vinas,

1984; Feldstein and Galperin, 1985]. Возникновение асимметричного кольцевого тока на ночной стороне магнитосферы обусловлено резким увеличением потока или инъекцией (ускорением) энергичных ионов и электронов во время фазы развития суббури. Инжекция происходит в ограниченном долготном секторе ночной магнитосферы, где возникает система продольных токов суббури и магнитное поле на экваторе быстро становится более дипольным. Эта область магнитосферы отображается в сияниях в виде авроральной выпуклости. Долготную протяженность выпуклости в сияниях можно определить по характерным возмущениям магнитного поля на средних широтах, которые обусловлены системой продольных токов суббури [Сергеев и Цыганенко, 1980; Rostoker et al., 1980].

Таким образом наземные наблюдения диффузных и дискретных сияний дают информацию о динамике околоземного ПС и области инъекции суббури. Это, в свою очередь, позволяет более детально исследовать связь возникновения SAR-дуги с динамикой энергичных частиц во внутренней магнитосфере. В последние годы на меридиане Якутска проводятся мониторинговые наблюдения сияний новыми цифровыми камерами всего неба (*ASI Keo Horizon*, см. раздел 2) на авроральных станциях в Жиганске (GMLat 62°, GMLon 196°) и Тикси (GMLat 67°, GMLon 199°). В настоящее время накоплены данные регистрации сияний одновременно с наблюдениями SAR-дуги на субавроральной ст. Маймага (GMLat 58°, GMLon 202°). В этой работе ставится задача **впервые** исследовать связь формирования SAR-дуги с усилением конвекции и инъекцией суббури по наблюдениям полярных сияний. Рассмотрено событие одновременных наблюдений на станциях Жиганск и Маймага 15 февраля 2018 г., в котором фаза роста суббури (усиление конвекции) произошла после поворота B_z ММП к югу.

2. МЕТОДЫ НАБЛЮДЕНИЙ И АНАЛИЗА ДАННЫХ

Исследование субаврорального свечения во время суббурь и бурь проводится на оптической станции Маймага (63° N, 130° E) с исправленными геомагнитными координатами 58° CGMLat и 202° CGMLon для эпохи 2015 г. Станция располагается севернее на 1° широты г. Якутска (62° N, 130° E) на одном географическом меридиане. Полночь по магнитному локальному времени (MLT) на меридиане Якутска соответствует ~15:50 UT. Наблюдение сияний и SAR-дуг с 2013 г. выполняются цифровой камерой всего неба (*All-sky imager (ASI)*) “*Keo Sentry*” производства фирмы “*Keo Scientific Ltd*”. *ASI* оснащен *CCD (Charge-coupled device)* камерой *PI Acton ProEM 1024B* и пяти-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 β), 620.0 (континуум), 480.0 нм (континуум). Высокая чувствительность *CCD* камеры с множителем электронов (EM) позволяет детально изучать широтную и долготную динамику формирования SAR-дуг, а также электронных и протонных сияний.

Во время наблюдений на станции Маймага также проводится регистрация интенсивности эмиссий 427.8 нм (N_2^+) и 630.0 нм [ОЛ] в магнитном зените станции четырехканальным фотометром с интерференционными светофильтрами и полем зрения 10°. Два канала фотометра измеряют континуум в окрестности указанных выше эмиссий. Полуширина полосы пропускания светофильтров равна 2 нм. Частота измерений интенсивности каждой эмиссии равна 1 Гц. Исследование пульсирующих вариаций интенсивности первой отрицательной системы полос N_2^+ (391.4, 427.8, 470.9 нм) в ночном свечении и диффузном сиянии с высоким временным разрешением (частота дискретизации 20 или 100 Гц) проводится фотометрами с полем зрения 20° и шириной частотной характеристики 0–10 Гц. Фотометры имеют стеклянные светофильтры с максимумом коэффициента пропускания в спектральной области 390–430 нм и направлены на фиксированные зенитные углы 45° S, 0° (Z), 73° N и 45° E.

С 2017 года мы проводим мониторинговые наблюдения полярных сияний панхроматическими (в видимой области спектра) цифровыми камерами всего неба “*Keo Horizon*” также производства фирмы “*Keo Scientific Ltd*” на станциях ИКФИА в Жиганске (CGMLat 62°, CGMLon 196°) и “Тикси” (CGMLat 67°, CGMLon 199°). Данные регистрации полярных сияний на этих станциях с разрешением по времени 3 с (20 кадров в минуту) дают информацию о радиальной и азимутальной динамике области инъекции энергичных частиц в магнитосфере во время усиления конвекции и фазы расширения суббурь. Одновременные наблюдения *ASI* на станциях Маймага, Жиганск и Тикси дают возможность исследовать связь формирования SAR-дуги с динамикой полярных сияний (области инъекции энергичных частиц) во время суббурь.

Данные *ASI* ст. Маймага представлены в этой работе в виде кеограмм, а также отдельных изображений в проекции на поверхность Земли для высот свечения 110 км для ДС и 250 (450) км для SAR-дуги в эмиссиях 557.7 и 630.0 нм, соответственно. Данные регистрации сияний на ст. Жиганск аналогично обрабатывались в предположении высоты дискретных сияний 110 км. Проекция изображений всего неба были построены в

исправленных геомагнитных координатах CGM-Lat и CGMLon на основе моделей геомагнитного поля DGRF/IGRF (<https://omniweb.sci.gsfc.nasa.gov/vitmo/cgm.html>). Для идентификации интервала времени, когда магнитосферная конвекция усиливалась, используются данные регистрации параметров солнечного ветра (СВ) с космического аппарата DSCOVR. Интервал MLT начала развития суббури был определен с помощью магнитограмм низкоширотных станций. Бухтообразные вариации H - и D -компонент на долготной цепочке низкоширотных станций дают информацию о начале фазы развития суббури и ее долготной протяженности [Сергеев и Цыганенко, 1980; Rostoker et al., 1980].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ. ОБЩИЙ АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ ЯВЛЕНИЙ 15 ФЕВРАЛЯ 2018 г.

Рисунок 1а показывает изменения параметров солнечного ветра (СВ) а также динамику субаврорального свечения в эмиссиях 557.7 и 630.0 нм на меридиане Якутска (130° E) во время наблюдений 15 февраля 2018 г. В $\sim 14:30$ UT, через ~ 10 мин после резкого увеличения электрического поля E_y утро-вечер ($-V_x \times B_z$) до ~ 2 мВ/м при относительно большой плотности СВ (~ 20 см $^{-3}$), началось расширение ДС в направлении экватора в зеленой и красной линии атомарного кислорода (см. кеограммы в этих эмиссиях на рис. 1б, 1в). Во время дальнейшего роста E_y СВ до ~ 3 мВ/м наблюдалось увеличение интенсивности ДС и началось формирование отдельного максимума свечения в эмиссии 630.0 нм экваториальнее ДС (см. рис. 1в). Такая динамика в красной линии указывает на возникновение SAR-дуги уже во время усиления магнитосферной конвекции. В разделах 4 и 6 появление красной дуги в это время показано более детально.

После начала фазы развития суббури продолжалось экваториальное смещение границы ДС, увеличивалась интенсивность красной дуги, происходило расширение и движение дуги через зенит станции на более низкие широты. После перехода E_y в область отрицательных значений произошло быстрое затухание ДС в эмиссии 557.7 нм после $\sim 17:30$ UT. В это время SAR-дуга имела максимальную яркость ~ 300 Рл на меридиане станции и наблюдалась до ~ 19 UT с медленным уменьшением интенсивности эмиссии 630.0 нм. Нужно также отметить, что в интервале 17:10–17:30 UT кеограмма в этой эмиссии показывает периодические вариации широты полярного края SAR-дуги. На кеограмме в зеленой линии видны отдельные пятна свечения в 17:20–17:40 UT, которые возникли на экваториальной границе ДС в окрестности зенита станции наблюдений.

В разделе 4 будет проведен более детальный анализ этих явлений в субавроральном свечении.

На рисунке 2 представлены данные одновременных наблюдений сияний на двух станциях и индексы магнитной активности 15 февраля 2018 г. Панхроматическая кеограмма ст. Жиганск отображает динамику дискретных сияний, а кеограмма ст. Маймага динамику ДС в эмиссии 557.7 нм в интервалах геомагнитных широт 60° – 65° и 57° – 62° , соответственно. Во время усиления магнитосферной конвекции при E_y утро-вечер наблюдалось движение дуг сияний до широты $\sim 61^\circ$ через зенит ст. Жиганск. Как было отмечено выше, экваториальное расширение ДС в эмиссии 557.7 нм началось в $\sim 14:30$ UT и достигло зенита ст. Маймага в $\sim 17:30$ UT. ASI “Keo Sentry” с высокой чувствительностью регистрировал экваториальную границу ДС с уровнем интенсивности зеленой линии 200–300 Рл на $\sim 3^\circ$ широты южнее дискретных сияний. ASI “Keo Horizon” на ст. Жиганск не зарегистрировал слабое ДС, а в начале фазы развития суббури наблюдал быстрое расширение области дискретных сияний к северу до геомагнитной широты $\sim 64^\circ$ (см. кеограммы на рис. 2).

Геомагнитные индексы на рис. 2в показывают, что во время усиления магнитосферной конвекции произошло плавное понижение индекса SYM-H с минимумом -20 нТл до начала фазы развития суббури, которая проявилась в вариации индекса ASY-H. Развитие небольших магнитных возмущений началось после SC в $\sim 08:38$ UT, который был вызван приходом фронта масс инжекции от вспышки класса C1. Рост индекса ASY-H произошел во время кратковременных флуктуаций $B_z < 0$ до ~ 14 UT (на рис. 1 не отображено).

Магнитограммы среднеширотных станций на рис. 3а–3в дают информацию о секторе MLT начала развития суббури в $\sim 16:58$ UT. Положительные вариации dX а также положительная и отрицательная бухты в dY на геомагнитных меридианах 113° и 150° , соответственно, указывают на положение центра начала активизации в интервале 20–22 MLT. Далее, активная область суббури расширялась в после полуночный сектор MLT согласно изменениям dY и dX в $\sim 17:20$ UT на меридиане 208° .

4. ДИНАМИКА СИЯНИЙ И SAR-ДУГИ ПО ДАННЫМ ИЗОБРАЖЕНИЙ ВСЕГО НЕБА ВО ВРЕМЯ СУББУРИ 15 ФЕВРАЛЯ 2018 г.

В этом разделе проведем детальный анализ данных оптических наблюдений во время суббури 15 февраля 2018 г. с использованием изображений всего неба. Сначала рассмотрим материал с регистрацией субаврорального свечения ASI “Keo Sentry” на ст. Маймага, полученный во время усиления магнитосферной конвекции (фазы роста

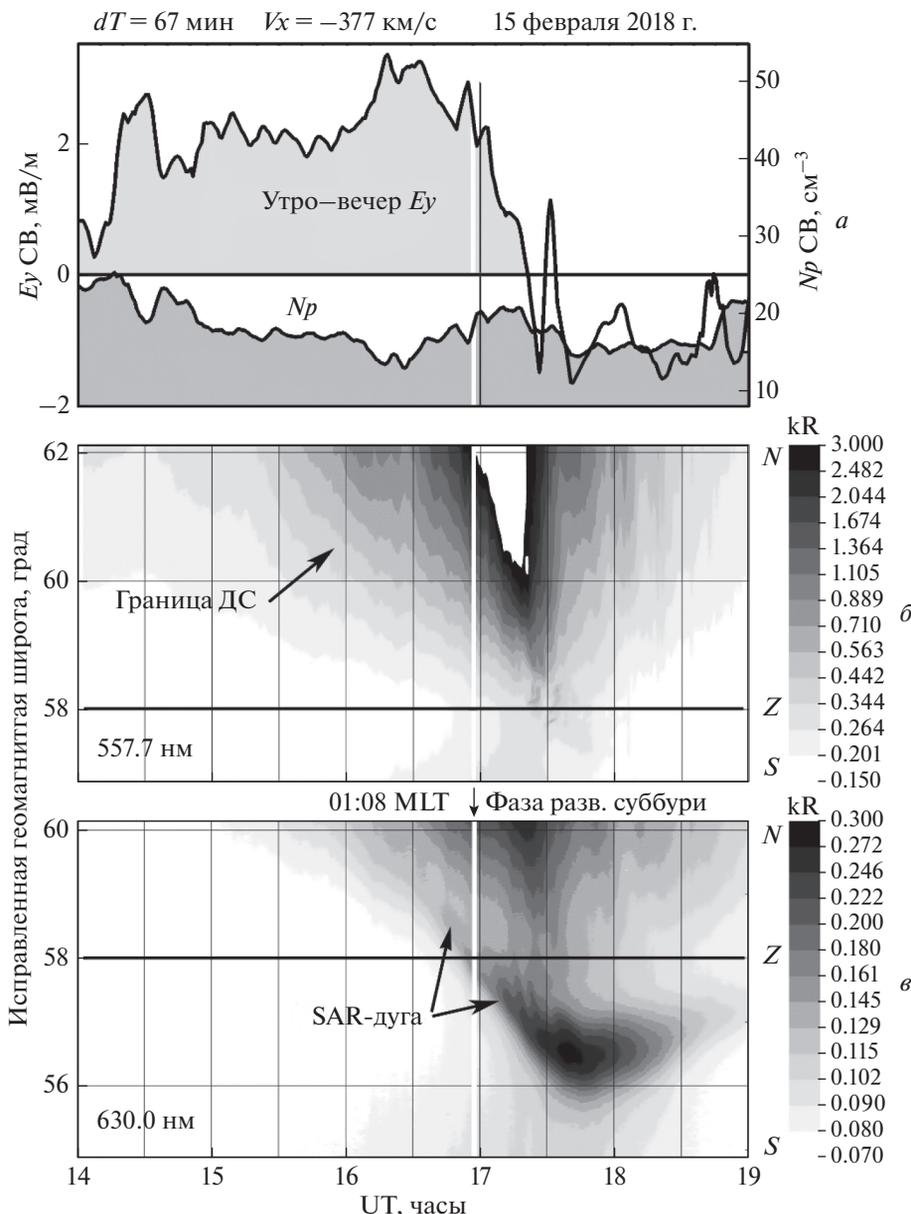


Рис. 1. Динамика солнечного ветра, диффузного сияния и SAR-дуги 15 февраля 2018. (a) – электрическое поле ($E_u = -V_x \times B_z$) и плотность (N_p) солнечного ветра со временем сдвига dT ; Данные ASI в виде кеограмм в эмиссиях 557.7 (б) и 630.0 нм (в) для высот свечения 110 и 250 км, соответственно, на ст. Маймага. Z – зенит ст. наблюдений. Шкалы интенсивности эмиссий в градациях серого приведены в килорелях (кРл). В зеленой линии установлена шкала до 3 кРл для более детального отображения экваториальной границы ДС.

суббури). На рис. 4 приведены изображения всего неба в красной линии атомарного кислорода для двух моментов времени в 16:50:30 и 16:58:30 UT. Видно, что в этом интервале времени регистрировалась однородная SAR-дуга вдоль геомагнитной параллели 58° в окрестности экваториальной границы ДС. SAR-дуга в течение 8 мин прошла зенит станции наблюдений с ростом ее интенсивности до 100–140 Рл. В западном и восточном направлениях интенсивность дуги увеличивается вследствие эффекта ван Райна. Результат регистрации

ASI показывает, что SAR-дуга сформировалась до начала фазы расширения суббури.

Данные наблюдений по всему небу на двух станциях во время расширения суббури представлены на рис. 5. Рисунок показывает динамику сияний и SAR-дуги в интервале времени 17:06–17:30 UT на станциях Жиганск и Маймага, соответственно. В это время ASI “Keo Horizon” регистрировал расширение сияний к востоку и северу в результате интенсификации и затем изгиба экваториальной дуги на геомагнитной широте ~61° в виде

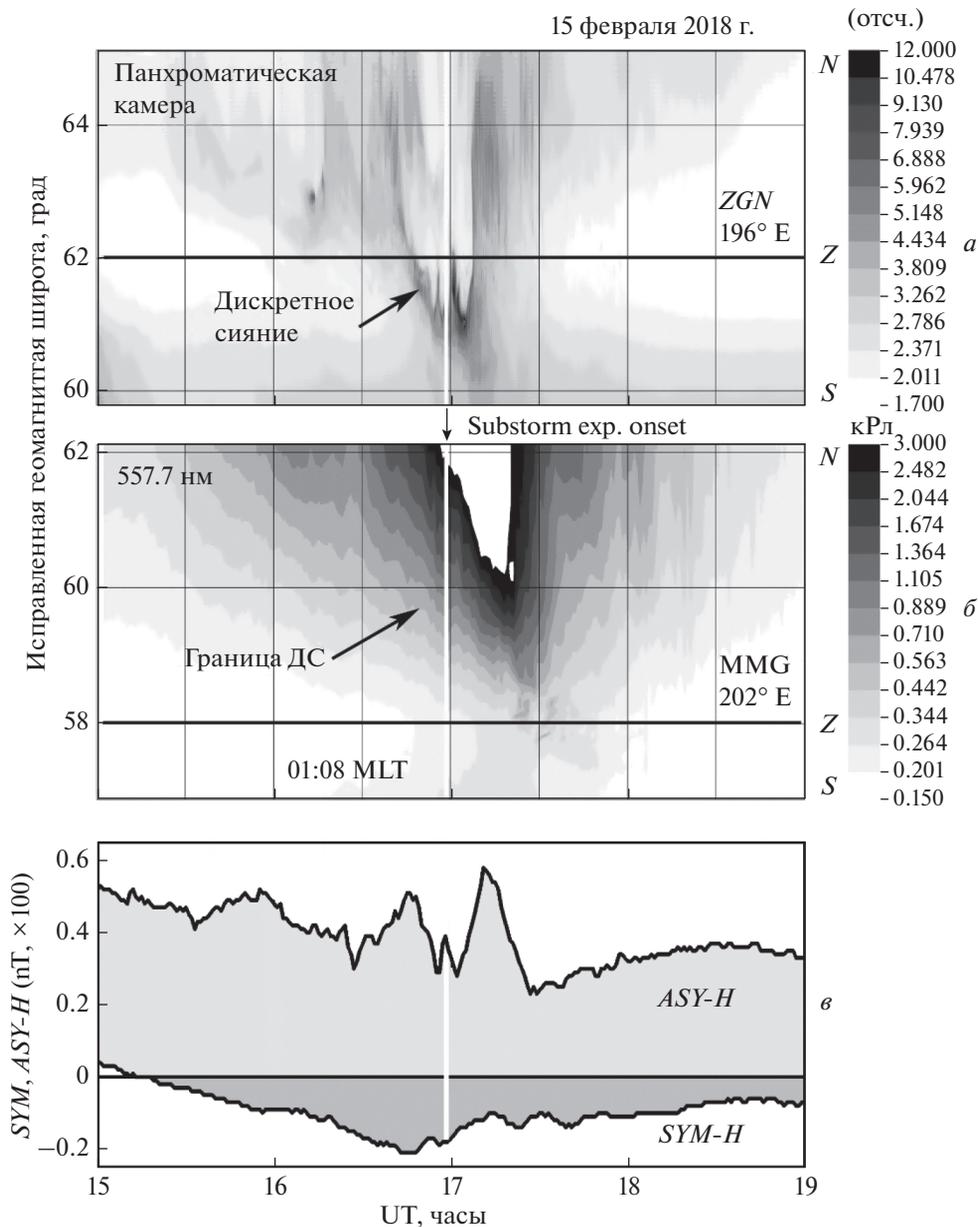


Рис. 2. Одновременные наблюдения сияний на двух станциях во время суббури 15 февраля 2018 г. Кеогаммы регистрации дискретного сияния на ст. Жиганск (а) и диффузного сияния в эмиссии 557.7 нм на ст. Маймага (б) для высоты свечения 110 км. Z – зенит ст. наблюдений. Шкала интенсивности эмиссий в градациях серого приведена в относительных единицах для Жиганска и в килореляях (кРл) для Маймаги. В зеленой линии установлена шкала до 3 кРл для более детального отображения экваториальной границы ДС; (в) – геомагнитные индексы $SYM-H$ и $ASY-H$ во время оптических наблюдений.

буквы омега или омега-полосы согласно систематизации авроральных форм в работе [Forsyth et al., 2020]. Фронт выпуклости интенсивного свечения с резкой границей двигался в восточном направлении. Положение фронта для двух моментов времени отмечено жирными точками на рис. 5. На заданной высоте сияния 110 км фронт двигался с угловой скоростью ~ 1 град./мин и, соответственно, линейной скоростью ~ 900 м/с на

геомагнитной параллели $\sim 62^\circ$. После прохода омега структуры через все небо наблюдалось медленное затухание сияний на геомагнитных широтах $63^\circ\text{--}65^\circ$ во время фазы восстановления суббури (см. изображение в 17:30:31 UT на рис. 5). Узкий сектор свечения на южном горизонте изображений обусловлен освещением поселка Жиганск.

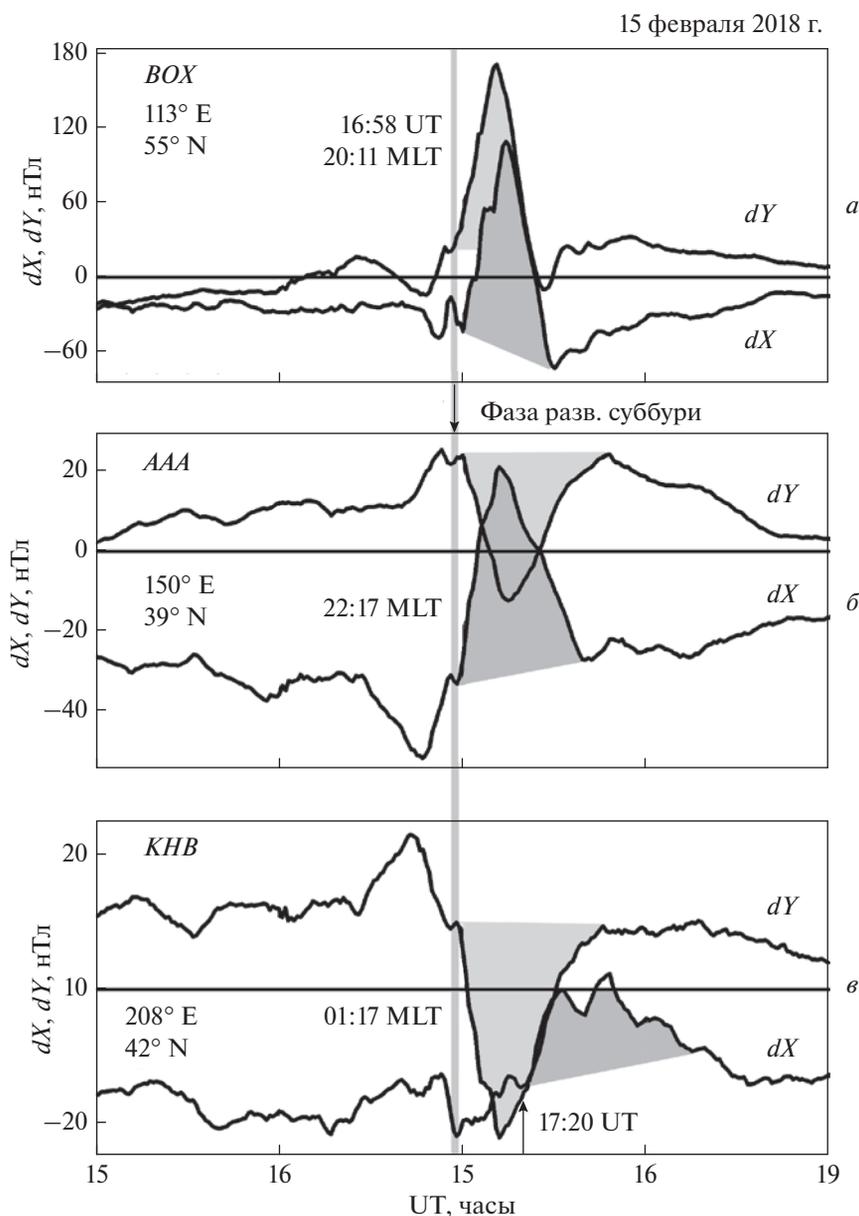


Рис. 3. Среднеширотные магнитные возмущения во время наблюдений 15 февраля 2018 г. Магнитограммы среднеширотных станций на магнитных меридианах 113° (а), 150° (б) и 208° (в). Приведены вариации X- и Y-компонент относительно их значений в ближайший магнитоспокойный день. На магнитограммах указано MLT начала расширения суббури, исправленные геомагнитные координаты и коды станций Борок (а), Алма-Ата (б) и Хабаровск (в), соответственно.

Изображения в эмиссии 630.0 нм справа на рис. 5 показывают изменения в ДС и SAR-дуге во время наблюдений сияний на ст. Жиганск. На ст. Маймага регистрация в красной линии атомарного кислорода в этом событии проводилась с экспозицией 8 с один раз в минуту. В 17:06:30 UT, через ~8 мин после начала фазы развития суббури, красная дуга наблюдалась в интервале геомагнитных широт 57° – 59° от западного до восточного горизонта. Широта границы ДС росла с увеличением долготы. Во время движения фронта выпуклости сияний на восток про-

исходило медленное увеличение интенсивности красной линии в SAR-дуге в этом же направлении и ее смещение до геомагнитной широты $\sim 56^\circ$. Изображение в 17:30:30 UT показывает, что интенсивность красной дуги увеличивалась с задержкой по времени в пределах 20 мин относительно активизации дискретных сияний по наблюдениям на ст. Жиганск. Увеличение яркости красной дуги до ~ 600 Рл в западной половине неба продолжалось в фазу восстановления суббури в полярных сияниях (см. изображения в 17:10:30 и 17:30:30 UT на рис. 5). Это хорошо видно при

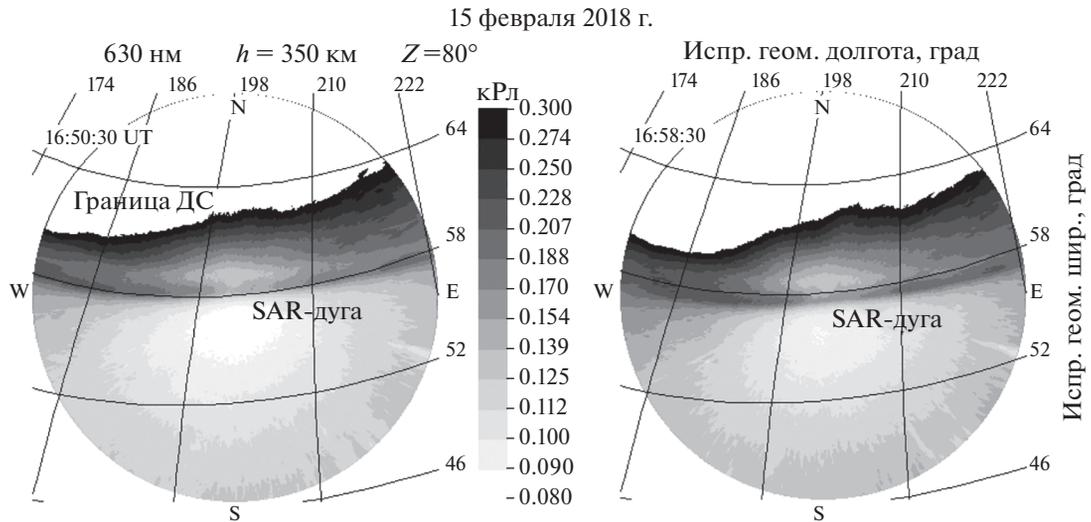


Рис. 4. Наблюдение SAR-дуги во время усиления магнитосферной конвекции 15 февраля 2018 г. Приведены изображения всего неба в эмиссии 630.0 нм в проекции на поверхность Земли в геомагнитных координатах для высоты свечения 350 км (Маймага). Шкала интенсивности эмиссии в градусах серого приведена до 0.3 кило-релеля (кРл) для более детального отображения экваториальной границы ДС и SAR-дуги.

быстром синхронном просмотре данных оптической регистрации на двух станциях.

Далее рассмотрим динамичные явления на экваториальной границе ДС и полярном крае SAR-дуги, которые отобразились на кеограммах в зеленой и красной линиях атомарного кислорода и были отмечены выше в разделе 3. На рис. 6а представлены оригинальные изображения всего неба с регистрацией ДС и SAR-дуги в 17:25:20 и 17:25:30 UT, соответственно. Для отображения слабого свечения соответствующие 16 бит графические файлы преобразованы в Фотошопе с использованием опции автоконтраст. Изображение в эмиссии 557.7 нм показывает лучи сияний в центральной части кадра. Такая картина сияний в форме короны наблюдается, когда лучи находятся в магнитном зените. Лучи сияний стали появляться с ~17:12 UT в окрестности экваториальной границы ДС, которая до этого была однородной. На оригинальном изображении в эмиссии 630.0 нм видно однородную экваториальную границу SAR-дуги и выступ свечения на ее полярном крае в центральной области кадра (на изображении показан стрелкой).

На рисунке 6б приведены обработанные изображения в проекции на поверхность Земли в геомагнитных координатах с одинаковым масштабом. Изображение в зеленой линии хорошо показывает разрыв экваториальной границы ДС на широте ~58° лучами сияния (короной) в окрестности магнитного зенита. Лучи двигались с запада на восток и регистрировались до ~18 UT. SAR-дуга в 17:25:30 UT в проекции на поверхность Земли имеет однородную экваториальную границу на геомагнитной широте ~56.5°. Полярный

край дуги в проекции неоднороден и имеет выступ свечения с протяженностью ~1 градус широты (указан стрелкой). Серия таких выступов перемещалась вдоль дуги в восточном направлении во время ее уярчения и появления лучей на границе ДС в 17:12–18:00 UT.

Рисунок 7 показывает перемещение выступов свечения на полярном крае SAR-дуги в интервале 17:18:30–17:30:30 UT. На изображениях отображена область неба для зенитных углов $Z \leq 51^\circ$ в геомагнитных координатах с масштабом, как на рис. 6б. Более детальное изображение фрагмента красной дуги получилось в результате увеличения принятой высоты свечения до 450 км. Для этой высоты угловая и линейная скорость движения выступа вдоль геомагнитной параллели ~57° (отмечен белой точкой) была равна ~0.9 град./мин и ~760 м/с, соответственно. Пересечения меридиана станции наблюдений рядом таких выступов были зарегистрированы на кеограмме в эмиссии 630.0 нм на рис. 1.

5. ФОТОМЕТРИЧЕСКАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ВАРИАЦИЙ СВЕЧЕНИЯ В ДС И SAR-ДУГЕ ВО ВРЕМЯ СУББУРИ 15 ФЕВРАЛЯ 2018 г.

На рисунке 8а приведены графики интенсивности эмиссий 427.8 нм (N_2^+) и 630.0 нм [ОI] по данным регистрации фотометра с полем зрения 10° в магнитном зените станции. Медленное увеличение интенсивности обеих эмиссий от 16 UT наблюдалось во время экваториального расширения ДС (см. рис. 1). С ~16:50 UT начался быстрый рост интенсивности красной линии как результат прихода в магнитный зенит экваториального

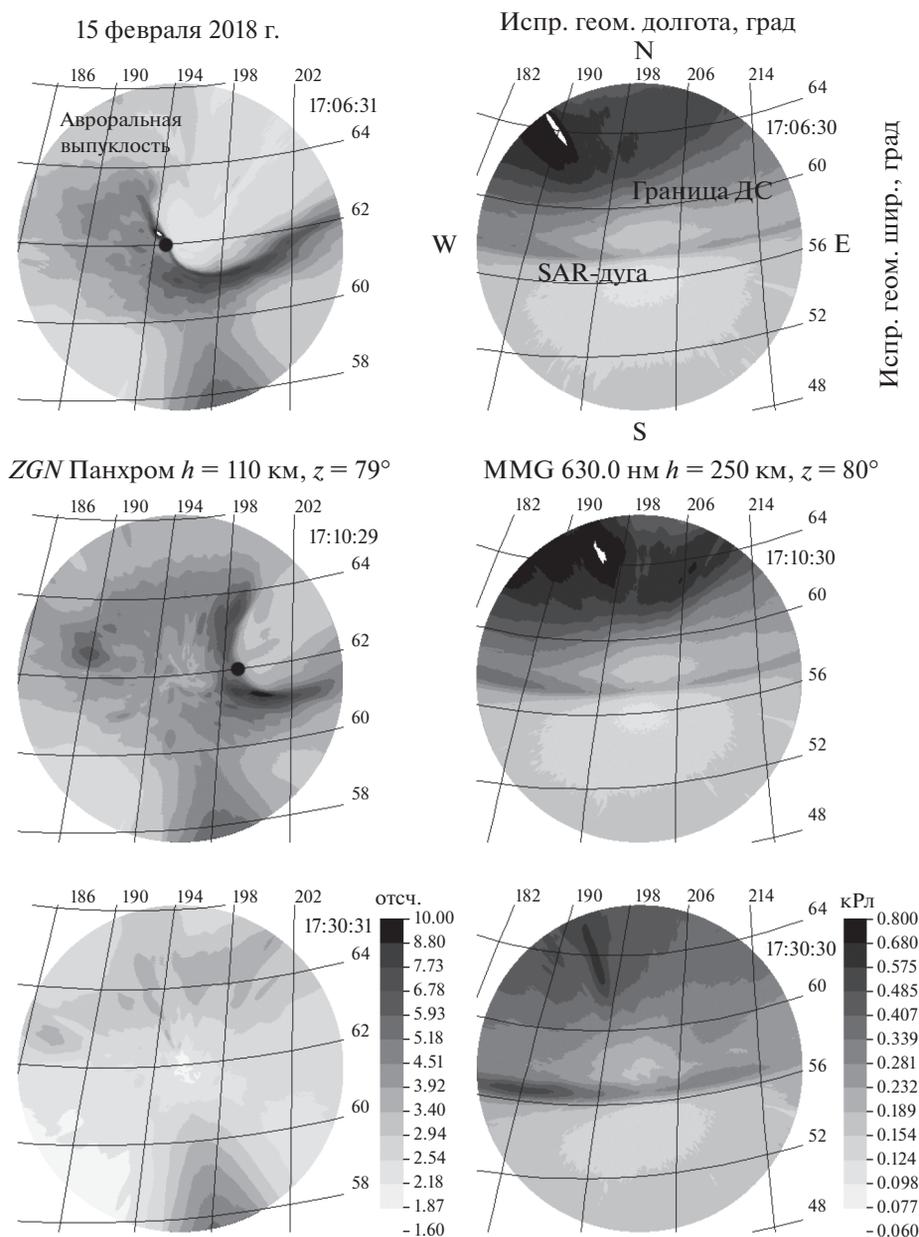


Рис. 5. Динамика сияний и SAR-дуги по всему небу на станциях Жиганск и Маймага 15 февраля 2018 г. Приведены изображения всего неба в проекции на поверхность Земли в геомагнитных координатах для высоты свечения 110 км (Жиганск) и 250 км для эмиссии 630.0 нм (Маймага). Шкала интенсивности эмиссии 630.0 нм в градациях серого приведена в килореляях. Для сияний в Жиганске – в относительных единицах, черной точкой показано положение границы выпуклости на геомагнитной параллели ~62°.

края возникающей SAR-дуги, что хорошо показывает кеограмма на рис. 1. В 17:10–17:30 UT зенитный фотометр зарегистрировал вариации красной линии с четырьмя максимумами интенсивности. Рис. 7 показывает, что эти изменения интенсивности эмиссии 630.0 нм [OL] были обусловлены проходом через поле зрения фотометра выступов свечения на полярном крае SAR-дуги.

В эмиссии 427.8 нм (N_2^+) произошел рост интенсивности до ~100 Рл после начала фазы развития

суббури. Кроме этого, в этой эмиссии наблюдались пульсирующие вариации интенсивности с ~17:05 UT. Наибольшая амплитуда пульсаций ~20 Рл была во время восстановления суббури в 17:30–18:00 UT.

На рисунках 8б, 8в представлены динамические спектры мощности пульсирующих вариаций интенсивности полос N_2^+ в интервале 0.02–0.2 и 0.1–1.0 Гц. Спектры были получены методом быстрого преобразования Фурье (БПФ). Наибо-

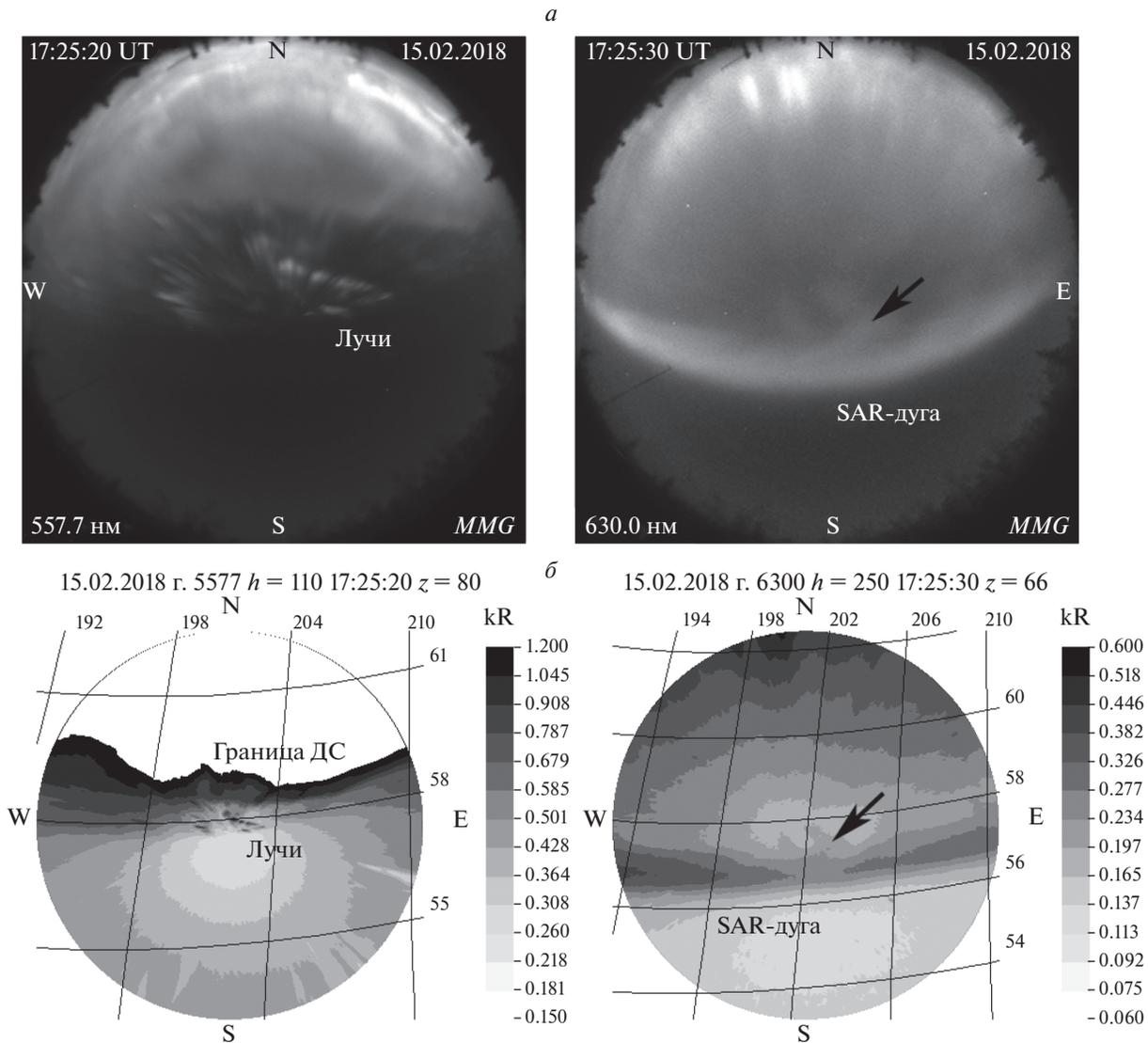


Рис. 6. Динамика свечения на границе диффузного сияния в эмиссии 557.7 нм и в области SAR-дуги во время суббури 15 февраля 2018 г.

(а) – оригинальные автоконтрастные изображения всего неба в эмиссиях 630.0 и 557.7 нм в 17:25:20 и 17:25:30 UT, соответственно. (б) – эти же изображения в проекции на поверхность Земли в геомагнитных координатах (как на рис. 4 и 5) для высоты свечения 250 и 110 км для красной и зеленой линии атомарного кислорода, соответственно. Шкалы интенсивности эмиссий в градациях серого приведены в килореляях, для зеленой линии до 1.2 кРл с целью более детального отображения экваториальной границы свечения.

лее интенсивные гармоники пульсаций свечения в окрестности 0.025, 0.04 и 0.12 Гц с периодами ~40, ~25 и ~8 с, соответственно, были зарегистрированы зенитным фотометром с частотой дискретизации 1 Гц. Всплески пульсаций в окрестности частот ~0.25, ~0.3, ~0.45, ~0.5 и ~0.8 Гц в интервале периодов 4.0–1.25 с наблюдались фотометром с частотой дискретизации 20 Гц также в зените станции (см. рис. 8в). Спектрограммы показывают одновременные всплески пульсаций на нескольких частотах. В действительности, короткие всплески пульсаций могут регистрироваться последовательно во времени в пределах длительно-

сти одной порции БПФ, которая составляет 251 и 102.4 с для спектров (б) и (в) на рис. 8, соответственно. Такая нерегулярность периодов является характерным свойством пульсаций свечения, наблюдаемых на широтах ДС и SAR-дуги во время суббури [Иевенко, 1995; Ievenko et al., 2008].

6. РЕГИСТРАЦИЯ T_e ПИКОВ НА СПУТНИКЕ SWARM-B ВО ВРЕМЯ НАБЛЮДЕНИЙ SAR-ДУГИ

Во время короткого события с наблюдением SAR-дуги 15 февраля 2018 г. спутник SWARM-B в

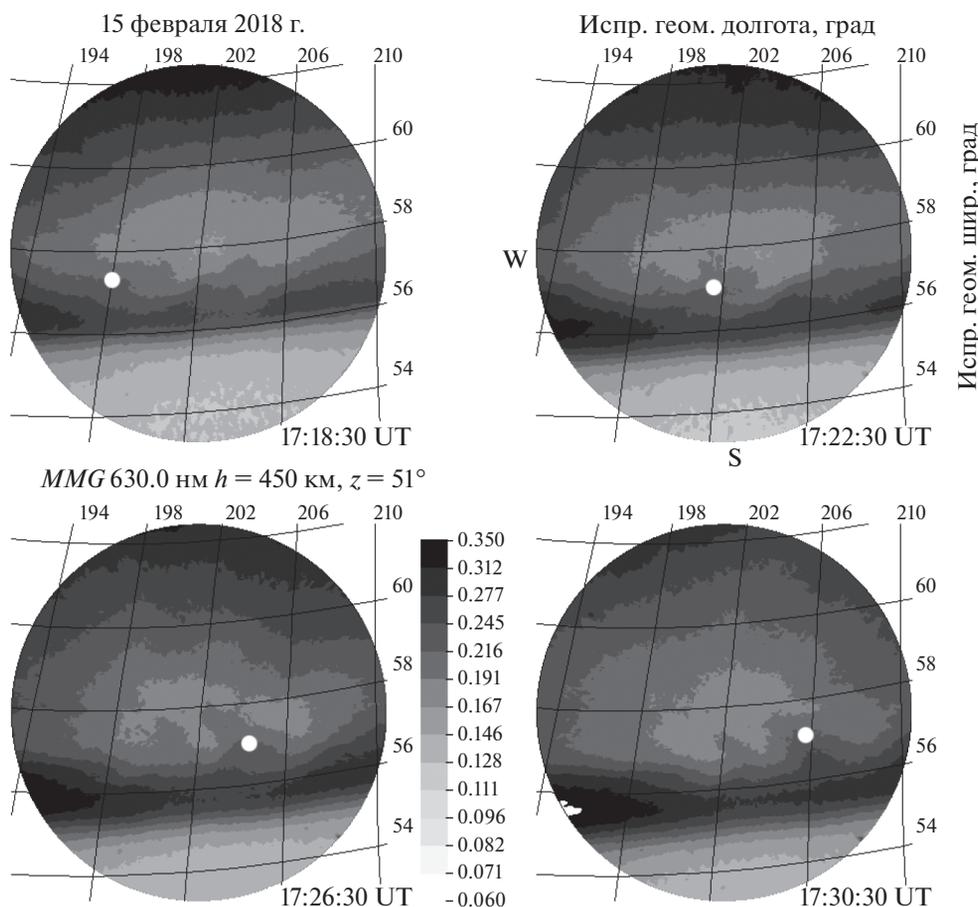


Рис. 7. Движение к востоку выступов свечения на полярном крае SAR-дуги во время суббури 15 февраля 2018 г. Обработанные изображения в эмиссии 630.0 нм в интервале 17:18:30–17:30:30 UT в проекции на поверхность Земли в геомагнитных координатах для высоты свечения 450 км и зенитных углов $Z \leq 51^\circ$. Шкала интенсивности эмиссии в градациях серого приведена в килорелях. Белая точка показывает положение выбранного выступа свечения по уровню интенсивности ~ 250 Рл на геомагнитной параллели $\sim 57^\circ$.

двух проходах вблизи меридиана Якутска измерял электронную температуру на высоте области F2 ионосферы. Рис. 9 показывает два изображения всего неба в эмиссии 630.0 нм вблизи моментов времени регистрации максимумов в T_e пиках (электронной температуры) на спутнике в первом и втором проходе, соответственно. В 16:59:30 UT спутник SWARM-B пересекал широты наблюдения красной дуги на $\sim 9^\circ$ восточнее, а в 18:33:30 UT на $\sim 15^\circ$ (1 ч) западнее меридиана оптических наблюдений. Оба пересечения SAR-дуги показаны на изображениях белыми линиями. Во время первого прохода спутника дуга наблюдалась через 1 мин после начала фазы расширения суббури. Второй проход был на фазе восстановления суббури во время затухания ДС и SAR-дуги. Первое изображение на рис. 9 показывает, что красная дуга в конце фазы роста суббури располагалась близко к границе ДС и имела интенсивность в зените ~ 130 Рл.

Для сопоставления SAR-дуги с T_e пиками были получены сканограммы с изображений вдоль географического меридиана станции наблюдений. Проходы спутника SWARM-B в интервале широт наблюдения красной дуги также примерно совпадали с соответствующими географическими меридианами. Географическая широта спутника во время измерений T_e -пиков на высоте 530 км была пересчитана для высоты эмиссии 630 нм 350 км с учетом наклона вектора геомагнитного поля. Рисунок 10 показывает широтное распределение электронной температуры (T_e) и интенсивности эмиссии 630.0 нм для проходов 1 и 2 спутника SWARM-B. Можно видеть хорошее совпадение положения SAR-дуги с T_e пиком для обоих проходов спутника. При этом в 16:59:30 UT полярная область красной дуги перекрывалась с ДС а в 18:33:30 UT широтные профили дуги и T_e пика стали более подобными во время затухания ДС. Обе сканограммы показывают рост интенсивности эмиссии 630.0 нм севернее T_e

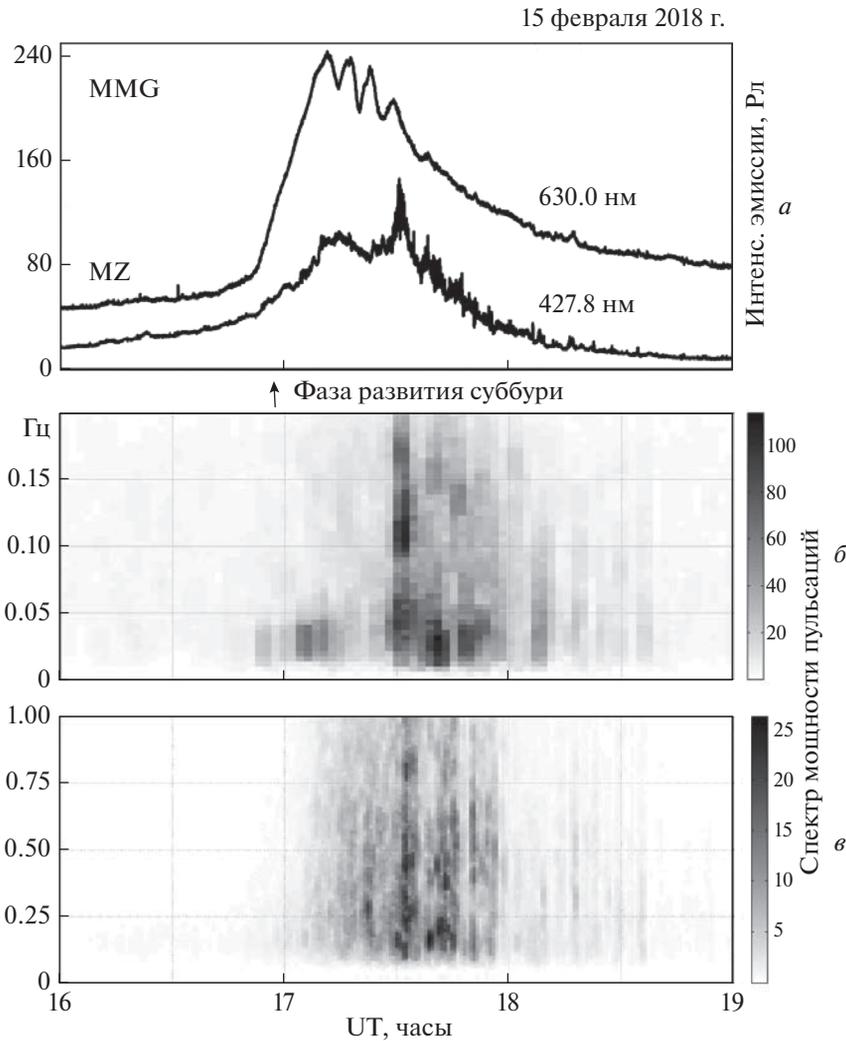


Рис. 8. Вариации интенсивности эмиссий на границе диффузного сияния и в SAR-дуге во время суббури 15 февраля 2018 г. (а) – интенсивность эмиссий 630.0 [O I] и 427.8 нм (N_2^+) в магнитном зените станции Маймага ($12^\circ S$); (б) – динамический спектр мощности пульсаций интенсивности полосы 427.8 нм (N_2^+) в области частот 0.02–0.2 Гц; (в) – динамический спектр мощности пульсаций интенсивности полос 391.4, 427.8 и 470.9 нм (N_2^+) в зените станции в области частот 0.2–1.0 Гц по данным фотометра с полем зрения 20° и частотой дискретизации 20 Гц.

пика на широтах ДС вследствие высыпания низкоэнергичных электронов. На широтах SAR-дуги в области Te пиков возбуждение красной линии атомарного кислорода вызывается сверхтепловыми электронами.

7. ОБСУЖДЕНИЕ

В разделах 3–4 впервые представлены данные одновременных наблюдений ASI динамики сияний и формирования SAR-дуги в авроральной и субавроральной зоне, соответственно. В разделе 5 получены спектры пульсирующих вариаций интенсивности первой отрицательной системы полос N_2^+ в области экваториальной границы ДС и

SAR-дуги по данным фотометрической регистрации в зените ст. Маймага. В разделе 6 наземные наблюдения SAR-дуги сопоставлены с регистрацией Te пиков на спутнике SWARM во время фазы роста и восстановления суббури. Далее, рассмотрим главные моменты в результатах инструментальных наблюдений.

7.1. Параметры солнечного ветра, динамика сияний и SAR-дуги вдоль меридиана во время фазы роста и расширения суббури

Магнитосферное возмущение в событии 15 февраля 2018 г. началось после SC в $\sim 08:38$ UT, который был вызван приходом фронта масс инжек-

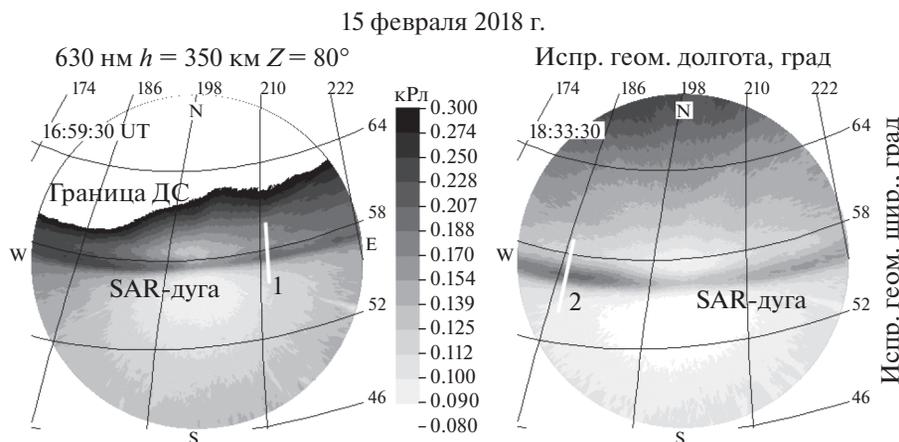


Рис. 9. Регистрация SAR-дуги во время проходов спутника SWARM-B вблизи меридиана Якутска 15 февраля 2018 г. Приведены изображения всего неба в эмиссии 630.0 нм в проекции на поверхность Земли в геомагнитных координатах для высоты свечения 350 км (Маймага) во время проходов сп. SWARM-B. Шкала интенсивности эмиссии в градусах серого приведена до 0.3 кРл для более детального отображения экваториальной границы ДС и SAR-дуги. Два пересечения SAR-дуги спутником SWARM-B показаны на изображениях белыми линиями.

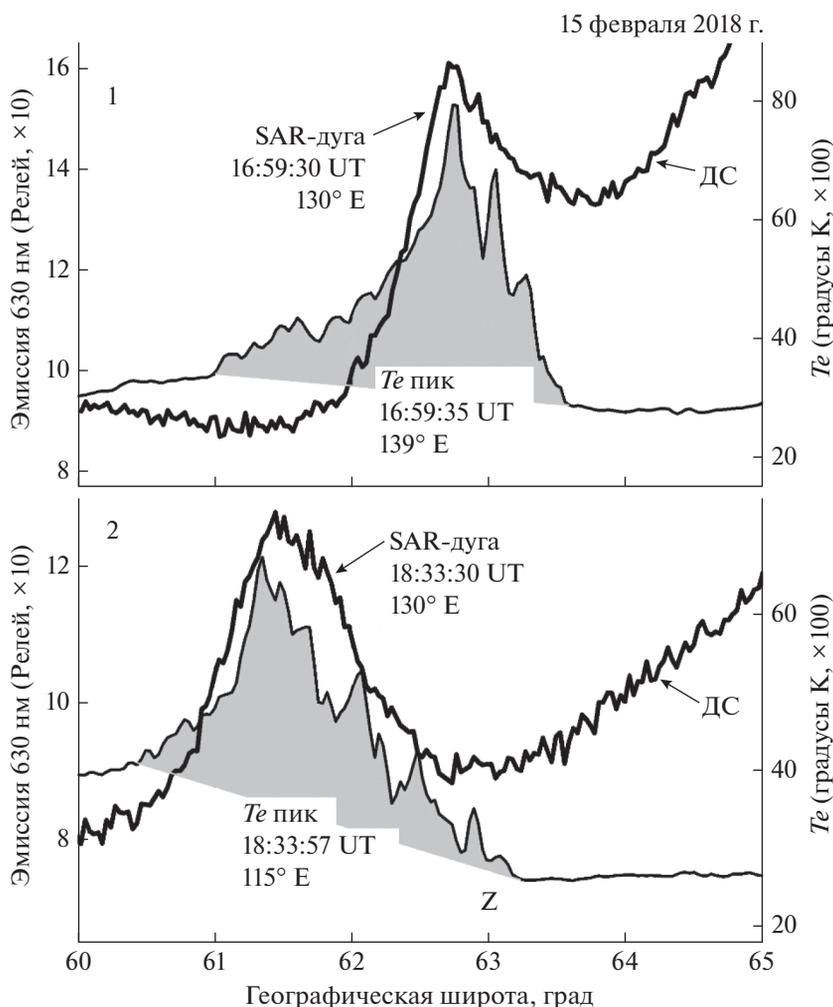


Рис. 10. Сопоставление T_e пиков с наблюдениями SAR-дуги на меридиане Якутска 15 февраля 2018 г. Приведены широтные распределения электронной температуры (T_e) и интенсивности эмиссии 630.0 нм для двух проходов спутника SWARM-B. Указано время и географическая долгота измерения максимумов в T_e пиках для обоих проходов спутника. На сканограммах приведено время наблюдения SAR-дуги и географический меридиан станции оптических наблюдений. Z-зенит станции.

ции от вспышки класса *C1*. Слабая вариация магнитного индекса *SYM-H* с минимумом -20 нТл произошла в следствии усиления магнитосферной конвекции при длительном (~ 3 ч) южном направлении *Bz* ММП. В это же время наблюдалось движение дуг сияний до широты $\sim 61^\circ$ через зенит ст. Жиганск. *ASI "Keo Sentry"* на ст. Маймага с высокой чувствительностью регистрировал слабое ДС в эмиссии 557.7 нм в широтном интервале $\sim 3^\circ$ к югу от дискретных сияний. В окрестности границы ДС в эмиссии 630.0 нм началось формирование SAR-дуги.

Фаза расширения суббури стартовала в вечернем секторе с последующим распространением в после полуночный сектор MLT согласно магнитным вариациям на средних широтах. В это время произошло быстрое расширение области дискретных сияний к северу и продолжалось движение к экватору границы ДС и красной дуги. Рост интенсивности дуги наблюдался и во время быстрого затухания ДС в эмиссии 557.7 нм при отрицательном значении *E_y* СВ (см. раздел 3 и рис. 1–3).

Известно, что экваториальная граница ДС отображает внутреннюю границу потока низкоэнергичных электронов плазменного слоя [Eather et al., 1976; Fairfield and Vinas, 1984; Feldstein and Galperin, 1985]. В ранних работах полагалось, что в ДС доминирует эмиссия 630.0 нм [ОЛ] [Eather et al., 1976; Slater et al., 1980]. Наши многолетние спектрофотометрические наблюдения субаврорального свечения на меридиане Якутска показали, что в ДС эмиссия 557.7 нм [ОЛ] обычно в 2–3 раза интенсивнее красной линии атомарного кислорода [Иевенко, 1993, 1999; Ievenko et al., 2008]. Такое соотношение этих эмиссий в ДС указывает на среднюю энергию высыпавшихся электронов $E = 1.0\text{--}1.4$ кэВ [Rees and Luckey, 1974].

Новые данные наблюдений *ASY "Keo Sentry"* подтверждают наши ранние результаты. На рис. 1 можно видеть, что во время экваториального расширения ДС интенсивность зеленой и красной линии атомарного кислорода на широте $\sim 59^\circ$ в $\sim 16:30$ UT была ~ 300 и ~ 120 Рл, соответственно, с отношением ~ 2.5 . Далее, в окрестности экваториальной границы ДС интенсивность красной линии растет вследствие механизма возбуждения SAR-дуги. Поэтому во время магнитосферных возмущений экваториальная граница диффузных высыпаний низкоэнергичных электронов плазменного слоя более однозначно отображается в эмиссии 557.7 нм [ОЛ].

Околоземная граница ПС при среднем уровне геомагнитной активности располагается вблизи плазмопаузы на ночной стороне [Fairfield and Vinas, 1984]. Соответственно, экваториальная граница ДС вероятнее всего отображает *L*-оболочки вблизи плазмопаузы в такие периоды. Поэтому

по скорости экваториального расширения ДС возможна оценка напряженности электрического поля конвекции *E_y* утро–вечер во внутренней магнитосфере. В рассмотренном событии 15 февраля 2018 г. в течение времени $16:00\text{--}17:20$ UT граница ДС по уровню интенсивности эмиссии 557.7 нм ~ 300 Рл двигалась в интервале геомагнитных широт $60^\circ\text{--}58^\circ$ со средней скоростью ~ 46 м/с для принятой высоты свечения 110 км (см. раздел 3 и рис. 1). В дипольном поле скорость движения границы плазменного слоя на магнитном экваторе в этом случае равна ~ 580 м/с. Такое радиальное движение плазмы могло быть обусловлено дрейфом в электрическом поле *E_y* утро–вечер ~ 0.33 мВ/м [Лайонс и Уильяме, 1987].

7.2. Важные детали в динамике сияний и SAR-дуги по данным изображений всего неба

В разделе 4 рассмотрены четыре важных момента в данных наблюдений сияний и SAR-дуги. Во-первых, было акцентировано внимание на факте регистрации *ASI "Keo Sentry"* возникновения SAR-дуги в окрестности границы ДС во время усиления магнитосферной конвекции до начала фазы расширения суббури. В новых данных наблюдений с использованием *ASI* такое явление регистрировалось и в других событиях. Это стало возможно благодаря высокой чувствительности и большому угловому разрешению новой камеры всего неба. Формирование красной дуги в таких случаях, наиболее вероятно, указывает на перекрытие потоков энергичных ионов с плазмопаузой как следствие усиления конвекции.

Во-вторых, это расширение авроральной выпуклости в восточном направлении в виде Омега структуры в результате изгиба экваториальной дуги сияния на широте $\sim 61^\circ$. На геомагнитной параллели $\sim 62^\circ$ резкий фронт выпуклости двигался с угловой скоростью ~ 1 град./мин (~ 900 м/с). В обзоре по динамике мезомасштабных форм полярных сияний [Forsyth et al., 2020] связывают наблюдения "Омега структуры" с интервалами времени развития и восстановления суббури.

В-третьих, на ст. Маймага наблюдалось увеличение интенсивности SAR-дуги на геомагнитных широтах $56^\circ\text{--}58^\circ$ с задержкой по времени в пределах 20 мин относительно активизации сияний по наблюдениям на ст. Жиганск. Увеличение яркости красной дуги в западной половине неба продолжалось в фазу восстановления суббури в полярных сияниях (см. изображения в $17:06:30\text{--}17:30:30$ UT на рис. 5).

Согласно механизмам генерации красной дуги [Cole, 1965, 1970; Cornwall et al., 1971] ее интенсивность должна увеличиваться с ростом потока захваченных энергичных ионов на *L*-оболочках плазмопаузы. В рассмотренном событии произо-

шло расширение области суббулевой инжекции энергичных частиц из вечернего в полуночный сектор MLT в интервале $L = 4.25-5.0$ для дипольного поля. На широтах дискретных сияний магнитное поле имеет вытянутую конфигурацию (не дипольное), но во время фазы развития суббури происходит быстрый возврат к квазидипольной конфигурации. Рост интенсивности SAR-дуги наблюдался на $L = 3.56-3.10$ в после полуночном секторе. Красная дуга расширилась до CGMLat $\sim 55.5^\circ$ ($L \sim 3.1$). Выполненное нами сопоставление наземных наблюдений SAR-дуги с данными одновременных измерений на борту спутника VAP-B для события 17 марта 2015 г. однозначно показало, что экваториальный край дуги обусловлен границей потока энергичных ионов внутри плазмосферы [Иевенко и Парников, 2020; Ievenko, 2020]. Это дает основание полагать, что во время распространения в восточном направлении области инжекции суббури происходило и перекрытие энергичной плазмы с внешней плазмосферой до $L \sim 3.1$ в послеполуночном секторе MLT.

Известный механизм радиальной диффузии с нарушением третьего адиабатического инварианта связан с периодом магнитного дрейфа энергичных частиц вокруг Земли во время флуктуаций электрического и магнитного полей. В окрестности $L \sim 4$ этот период для ионов с энергией ~ 50 кэВ равен ~ 210 мин [Лайонс и Уильямс, 1987]. Рассмотренное событие и наши более ранние наблюдения на меридиане Якутска [Иевенко, 1993, 1999; Ievenko et al., 2008] показывают, что увеличение потоков энергичных ионов на L -оболочках плазмопаузы во время суббури происходит через 15–20 мин после начала фазы развития суббури. Новые данные также указывают на начало формирования SAR-дуги (процесса перекрытия) уже во время усиления магнитосферной конвекции. Результаты наших исследований свидетельствуют о существовании механизма быстрого проникновения потоков энергичных ионов на L -оболочки внешней плазмосферы во время усиления магнитосферной конвекции и фазы развития суббури.

И, в-четвертых, в событии 15 февраля 2018 г. впервые рассмотрены инструментальные наблюдения возникновения лучей (короны) на экваториальной границе ДС в эмиссии 557.7 нм и появление выступов свечения на полярном крае красной дуги. Лучи сияния наблюдались только в зеленой линии атомарного кислорода, что указывает на среднюю энергию выпадающих электронов больше 2 кэВ [Rees and Luckey, 1974]. Неоднородный край SAR-дуги и лучи в ДС наблюдались одновременно в окрестности зенита станции наблюдений, что исключает большое изменение их взаимного положения в проекции на поверхность Земли для различных высот свечения. Рис. 6б показывает, что лучи на границе ДС на-

блюдались в области неоднородностей в эмиссии 630.0 нм на полярном крае красной дуги.

Считается, что ДС пространственно совпадает с областью продольных токов (FAC) зоны 2 [Fairfield and Vinas, 1984; Feldstein and Galperin, 1985; Fujii et al., 1990]. В работе [Heilig and Lühr, 2013] было показано, что в окрестности плазмопаузы возможно увеличение активности FAC . На основе сопоставления регистрации мелкомасштабного FAC (размер около 10 км) в верхней ионосфере спутником CHAMP и измерений положения плазмопаузы в окрестности магнитного экватора на космическом аппарате IMAGE получена хорошая сопряженность этих структур. Эти же авторы [Heilig and Lühr, 2018] из наблюдений мелкомасштабного FAC и плазмопаузы спутниками Swarm и VAP-B, соответственно, подтвердили более ранние результаты и выявили хорошее совпадение L -оболочек этих магнитосферных явлений в полуночном секторе MLT. Это дает основание полагать, что возникновение лучей на границе ДС могло быть связано с интенсификацией восходящего мелкомасштабного FAC зоны 2 в окрестности плазмопаузы во время фазы развития суббури. При этом в области восходящего мелкомасштабного тока, возможно, происходило увеличение средней энергии выпадающих электронов как в дискретных сияниях.

Как было отмечено выше, лучи на экваториальной границе ДС в эмиссии 557.7 нм возникали вблизи выступов свечения на полярном крае красной дуги (см. раздел 4 и рис. 6б). Такое явление в SAR-дуге может быть обусловлено возникновением неоднородностей электронной плотности на границе внешней плазмосферы. Уникальный случай наблюдений вариаций плотности электронов на границе плазмосферы на спутнике VAP-A рассмотрен в работе [He et al., 2020]. В этом событии VAP-A зарегистрировал множество резких изменений электронной плотности на порядок при его проходе вдоль границы плазмосферы в плоскости магнитного экватора. Скачки плотности электронов были обнаружены в интервале 15:30–17:10 MLT до пересечения плазмопаузы.

Это дает основание предполагать, что в событии 15 февраля 2018 г. неоднородности свечения на полярном крае SAR-дуги отображали долготные вариации электронной плотности на границе внешней плазмосферы в после полуночном секторе MLT. В этом случае движение выступов свечения в восточном направлении, возможно, было обусловлено электрическим дрейфом неоднородностей плотности холодной плазмы в плоскости магнитного экватора. Дрейф неоднородностей с угловой скоростью ~ 0.9 град./мин мог быть вызван радиальным электрическим полем с $E_x \sim \sim 3.8$ мВ/м, которое направлено к Земле на маг-

нитном экваторе и примерно в ~ 3 раза больше по-ля коротации на L -оболочке плазмопаузы в этом событии [Лайонс и Уильяме, 1987]. Следует отметить, что выступы свечения на полярном крае SAR-дуги наблюдаются, по-видимому, нередко. В работе [Mendillo et al., 2016] авторы выделили аналогичный тип красных дуг с широтными неоднородностями за период наблюдений 1987–2014 гг. в обл. Millstone Hill/Haystack. Но динамические свойства этого явления в этой работе не показаны по причине низкого временного разрешения регистрации.

7.3. Пульсирующие вариации интенсивности эмиссий 427.8 нм (N_2^+) и 630.0 нм [OI] в зените станции наблюдений. Важная информация

В разделе 5 рассмотрены данные фотометрических наблюдений свечения в окрестности зенита станции наблюдений. Фотометр с частотой дискретизации 1 Гц зарегистрировал в магнитном зените ($15^\circ S$) рост интенсивности эмиссии 630.0 нм [OI] как следствие экваториального смещения SAR-дуги. Квазипериодические вариации интенсивности красной линии были обусловлены движением в восточном направлении выступов свечения на полярном крае дуги. В этой же области наблюдалось увеличение фона в эмиссии 427.8 нм (N_2^+) с последующим развитием пульсаций интенсивности с амплитудой до ~ 20 Рл (см. рис. 7а). Динамические спектры мощности пульсаций свечения выявили интенсивные гармоники в интервале частот 0.02–0.2 и 0.2–1.0 Гц (см. рис. 7б, 7в и раздел 5). Пульсации в эмиссии 427.8 нм были обусловлены пульсирующим высыпанием энергичных частиц на широтах плазмопаузы.

В ранних работах [Иевенко, 1995; Ievenko et al., 2008] мы полагали, что один из типов пульсаций свечения в виде коротких всплесков с частотами 0.5–1.0 Гц может быть следствием развития циклотронной неустойчивости с формированием моноэнергичного сгустка электронов, осциллирующего между зеркальными точками. На $L \sim 3.3$ электроны с энергией 8–30 кэВ с питч-углами вблизи конуса потерь имеют баунс период 1–2 с, соответственно. Возможность автомодуляции циклотронной неустойчивости на баунс-резонансе в области холодной плазмы была показана в работе Беспалов и Трахтенгерц [1985]. Но дальнейший анализ данных фотометрических наблюдений не выявил кратных частот пульсаций свечения, которые должны быть при баунс-резонансе циклотронной неустойчивости.

Известно, что пульсирующие высыпания энергичных электронов могут быть вызваны электромагнитными ионно-циклотронными (ЭМИЦ) волнами в результате модуляции питч-угловой

диффузии и, соответственно, потока частиц в конусе потерь с частотой волны. Питч-угловая диффузия в этом случае должна быть обусловлена электрон-циклотронной неустойчивостью [Cogniti and Kennel, 1970]. В рассмотренном выше событии пульсирующие высыпания энергичных электронов (пульсации свечения) регистрировались на $L \sim 3.3$ в интервале частот 0.02–0.8 Гц, который находится в основном ниже гирочастоты ионов кислорода (~ 0.8 Гц) на этой L -оболочке. Соответственно, возбуждение ЭМИЦ волн в указанном выше интервале частот на $L \sim 3.3$ возможно на циклотронном резонансе с энергичными ионами кислорода, которые могут доминировать в кольцевом токе во время магнитной бури [Kozyra et al., 1987; Иевенко и Парников, 2020; Ievenko, 2020].

Новые наблюдения *ASY “Keo Sentry”* выявили возникновение лучей на экваториальной границе ДС и движение выступов свечения на полярном крае SAR-дуги, которые, вероятнее всего, обусловлены интенсификацией *FAC* зоны 2 и радиальным электрическим полем (см. раздел 6.2). Оба эти явления могут вызвать возбуждение ЭМИЦ волн и, соответственно, пульсирующие высыпания энергичных частиц на L -оболочках внешней плазмосферы.

7.4. Сопоставление Te -пиков с наземными наблюдениями SAR-дуги

Субавроральные пики электронной температуры (Te пики) на высотах области $F2$ ионосферы являются характерным признаком SAR-дуг. Регистрация Te пиков спутником SWARM-B на широтах красной дуги верифицируют наземные наблюдения дуги во время усиления конвекции и фазы расширения суббури 15 февраля 2018 г. Кроме этого, широтные распределения Te и интенсивности эмиссии 630.0 нм для двух проходов спутника на рис. 10 показывают разные механизмы излучения красной линии атомарного кислорода в SAR-дуге и ДС.

Также следует отметить хорошее подобие широтных профилей Te и красной дуги в окрестности зенита и экваториальнее станции наблюдений в первом и втором проходе спутника SWARM-B. Такое совпадение профилей было получено для высоты красной линии атомарного кислорода в SAR-дуге 350 км. При увеличении высоты красной эмиссии в дуге до общепринятой 400–450 км ее расхождение с Te пиком растет. Согласно модели атмосферы MSISE-90 на этих высотах концентрация атомарного кислорода уменьшалась в ~ 9 раз в минимуме 23-го солнечного цикла [Ievenko, 2020]. Это дает основание полагать, что высота SAR-дуг может быть значительно меньше в минимуме относительно их высоты в максимуме солнечного цикла. Наблюдения

ния в феврале 2018 проводились в минимуме 24-го цикла солнечной активности.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе **впервые** представлены данные одновременных наблюдений динамики сияний и формирования SAR-дуги на авроральных и субавроральных широтах, соответственно. Рассмотрено событие суббури при отсутствии выраженного признака магнитной бури с минимумом $SYM-H = -20$ нТл. Выполнен детальный анализ явлений в ДС и SAR-дуге, которые ранее не рассматривались в аналогичных работах, включая: формирование SAR-дуги во время фазы роста суббури (усиления конвекции), возникновение лучей (короны) на экваториальной границе слабого ДС в эмиссии 557.7 нм и движение к востоку выступов свечения на полярном крае красной дуги. Основные результаты исследования заключаются в следующем:

1. Усиления магнитосферной конвекции при длительном южном направлении B_z ММП наблюдалось в экваториальном расширении ДС в широтном интервале $\sim 3^\circ$ к югу от дискретных сияний. Отношение интенсивности эмиссий 557.7/630.0 нм в ДС было ~ 2.5 . В окрестности границы ДС в эмиссии 630.0 нм началось формирование SAR-дуги до начала фазы расширения суббури. По скорости экваториального расширения ДС сделана оценка в дипольном приближении электрического поля конвекции E_y утро–вечер как ~ 0.33 мВ/м на магнитном экваторе.

2. Увеличение интенсивности и экваториальное расширение SAR-дуги во время распространения авроральной выпуклости к востоку свидетельствовало о возникновении перекрытия энергичной плазмы с внешней плазмосферой до $L \sim 3.1$ в течение 20–30 мин после начала фазы развития суббури. Это указывает на существование процесса быстрого проникновения потоков энергичных ионов на L -оболочки внешней плазмосферы во время инъекции суббури.

3. Показано, что возникновение лучей на границе ДС в эмиссии 557.7 нм могло быть оптическим проявлением интенсификации мелкомасштабного (~ 10 км) FAC зоны 2 в окрестности плазмопаузы согласно исследованию Heilig and Lühr [2013, 2018]. Движение выступов свечения на полярном крае SAR-дуги, возможно, отображало электрический дрейф к востоку неоднородностей холодной плазмы на границе плазмосферы. Радиальное электрическое поле в этом событии было оценено как ~ 3.8 мВ/м на магнитном экваторе, что в ~ 3 раза больше поля коротации на L -оболочке плазмопаузы.

4. В области перекрытия ДС и SAR-дуги наблюдались пульсации свечения в эмиссии 427.8 нм (N_2^+), вызванные пульсирующим высыпанием энергичных частиц, возможно, в результате моду-

ляции питч-угловой диффузии ЭМИЦ волнами. Пульсации в высыпаниях регистрировались на $L \sim 3.3$ в интервале частот 0.02–0.8 Гц, который расположен ниже гирочастоты ионов кислорода (~ 0.8 Гц) на этой L -оболочке. Соответственно, возбуждение ЭМИЦ волн в этом событии могло быть на циклотронном резонансе с энергичными ионами кислорода.

5. SWARM-B зарегистрировал Te пики на широтах SAR-дуги в двух проходах вблизи меридиана ст. наблюдений. Данные измерений электронной температуры верифицируют наземные наблюдения SAR-дуги во время усиления магнитосферной конвекции и фазы расширения суббури 15 февраля 2018 г.

9. 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>).

Геомагнитные индексы были получены в WDC C2 for Geomagnetism, Kyoto (<http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html>).

Геомагнитные данные среднеширотных станций были получены на сайте INTERMAGNET (<http://www.intermagnet.org>).

Исправленные геомагнитные координаты рассчитывались в NASA service (<https://omniweb.sci.gsfc.nasa.gov/vitmo/cgm.html>).

Данные по плазменным измерениям на спутнике SWARM-B были получены на сайте ESA (https://swarm-diss.eo.esa.int/#swarm%2FAdvanced%2FPlasma_Data).

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания № 122011700172-2 при частичной поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проекты № 18-45-140037 p_a и № 21-55-50013.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Беспалов П.А., Трахтенгерц В.Ю. Автомодауляция циклотронной неустойчивости на баунс-резонансе // Магнитосферные исследования. М.: ИЗМИРАН, № 7. С. 40–43. 1985.
- Зайцева С.А., Пудовкин М.И., Дряхлов В.В., Дьяченко В.Н. Динамика пояса DR-токов и среднеширотные красные дуги // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 11. № 5. С. 853–859. 1971.
- Иевенко И.Б. Динамика диффузного аврорального свечения и SAR-дуги в период суббури // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 33. № 5. С. 42–57. 1993.
- Иевенко И.Б. Пульсирующие высыпания частиц в области SAR-дуги вследствие суббури // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 35. № 3. С. 37–46. 1995.

- *Иевенко И.Б.* Воздействие магнитосферной активности на плазмасферу по наблюдениям диффузного сияния и SAR-дуги // Геомагнетизм и аэрономия. 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 аэрономия. Т. 44. № 5. С. 643–654. 2004.
- *Иевенко И.Б., Парников С.Г.* Наземные и спутниковые наблюдения SAR-дуги в вечернем секторе MLT в начале магнитной бури 17 марта 2015 г. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 60. № 6. С. 751–761. 2020. <https://doi.org/10.31857/S0016794020050090>
- *Лайонс Л., Уильяме Д.* Физика магнитосферы. М.: Мир, 312 с. 1987.
- *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 // Annales de Geophysique. 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.
- *Coroniti F.V., Kennel C.F.* Auroral micropulsation instability. J. Geophys. Res. V. 75. № 10. P. 1863–1878. 1970.
- *Eather R.H., Mende S.B., Juge R.I.R.* Plasma injection at synchronous orbit and temporal auroral morphology // J. Geophys. Res. V. 81. P. 2805–2824. 1976.
- *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>
- *Forsyth C., Sergeev V.A., Henderson M.G., Nishimura Y., Gallardo-Lacourt B.* Physical processes of meso-scale, Dynamic auroral forms // Space Sci Rev. V. 216. P. 46. 2020. <https://doi.org/10.1007/s11214-020-00665-y>
- *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>
- *Fujii R., Hoffman R.A., Sugiura M.* Spatial relationship between Region 2 field-aligned currents and electron and ion precipitation in the evening sector // J. Geophys. Res. V. 95. № A11. P. 18939. 1990. <https://doi.org/10.1029/JA095iA11p18939-18947>
- *He F., Guo R.L., Dunn W.R et al.* Plasmapause surface wave oscillates the magnetosphere and diffuse aurora // Nature Communications. V. 11. P. 1668. 2020. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15506-3>
- *Heilig B., Lühr H.* New plasmapause model derived from CHAMP field-aligned current signatures // Ann. Geophys. V. 31. P. 529–539. 2013. <https://doi.org/10.5194/angeo-31-529-2013>
- *Heilig B., Lühr H.* Quantifying the relationship between the plasmapause and the inner boundary of small-scale field-aligned currents, as deduced from Swarm observations // Ann. Geophys. V. 36. P. 595–607. 2018. <https://doi.org/10.5194/angeo-36-595-2018>
- *Horwitz J.L., Cobb W.K., Baugner C.A., Chappell C.R., Frank L.A., Eastman T.E., Anderson R.R., Shelley E.G., Young D.T.* On the relationship of the plasmapause to the equatorward boundary of the auroral oval and the inner edge of the plasma sheet // J. Geophys. Res. V. 87. № A7. P. 9059–9069. 1982.
- *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.* SAR-arc observation during the overlap registration of an energetic plasma with a plasmapause aboard the Van Allen probe // J. Atmos. Sol.–Terr. Phys. V. 209. P. 105386. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105386>
- *Kozyra J.U., Shelly E.G., Comfort R.H., Brace L.H., Cravens T.E., Nagy A.F.* The role of ring current O⁺ 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.
- *Martinis C., Baumgardner J., Mendillo M. et al.* First ground-based conjugate observations of stable auroral red (SAR) arcs. J. Geophys. Res.: Space Physics. V. 124. P. 4658–4671. 2019. <https://doi.org/10.1029/2018JA026017>
- *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>
- *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)
- *Rees M.H., Luckey D.* Auroral electron energy derived from ratio of spectroscopic emissions. 1. Model computations // J. Geophys. Res. V. 79. № A34. P. 5181. 1974.
- *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>
- *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>
- *Slater D.W., Smith L.L., Kleckner E.W.* Correlated observations of the equatorward diffuse auroral boundary // J. Geophys. Res. V. 85. № A2. P. 531–542. 1980.