

УДК 550.385

## СВЯЗЬ ВЫСОТЫ СТАБИЛЬНЫХ АВРОРАЛЬНЫХ КРАСНЫХ ДУГ С СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТЬЮ. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ НА МЕРИДИАНЕ ЯКУТСКА

© 2023 г. И. Б. Иевенко<sup>1</sup>, \*, С. Г. Парников<sup>1</sup>, А. В. Сокольников<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт космических исследований и астрономии имени Ю.Г. Шафера Сибирского отделения  
Российской академии наук, Якутск, Россия

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

Поступила в редакцию 17.09.2022 г.

После доработки 05.10.2022 г.

Принята к публикации 26.10.2022 г.

Представлены первые результаты триангуляционных измерений высоты красных дуг на меридиане Якутска в 2015–2020 гг. Получены значения высоты нижней границы свечения в дугах 350–370 км вблизи максимума и 250–290 км во время минимума солнечной активности в 24 цикле. Уменьшение высоты красных дуг в годы минимума обусловлено значительным падением плотности верхней нейтральной атмосферы.

DOI: 10.31857/S0367676522700454, EDN: AIMSUY

### ВВЕДЕНИЕ

Стабильные авроральные красные (SAR) дуги возникают вследствие перекрытия кольцевого тока с внешней плазмосферой (плазмопаузой) во время магнитных бурь, которые определяются по вариации геомагнитного индекса *Dst* [1–3]. Потoki энергичных ионов нагревают плазмосферные электроны согласно механизмам, предложенным Коул [4, 5] а также Корнуолл и др. [6]. Возникающий нисходящий поток сверхтепловых электронов вдоль линий магнитного поля увеличивает окружающую электронную температуру на высотах области *F2* ионосферы в виде субаврорального пика электронной температуры (*Te* пика). В результате происходит усиление интенсивности красной линии атомарного кислорода в SAR-дуге, отображающей плазмопаузу [3].

Согласно механизму генерации SAR-дуги Коула, 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. Обобщение Коула хорошо соответствовало имеющимся в то время наблюдениям SAR-дуг. После теоретической работы Корнуолл и др. многие исследователи стали считать, что SAR-дуги должны возникать во время фазы восстановления бури.

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 [3, 7]. 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 во время суббурь [8–10].

Наши многолетние наблюдения субаврорального свечения на меридиане Якутска (62° с.ш., 130° в.д.) 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). В случае длительной суббуревой активности SAR-дуга отделяется от ДС и движется в экваториальном направлении [11–15]. 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 (В) в начале большой магнитной бури [16, 17]. В нашей работе [18] впервые представлены результаты одновременных наблюдений ASI динамики сияний и формирования SAR-дуги на авроральных и субавроральных широтах, соответственно.

В настоящее время принято считать, что высота излучения красной линии атомарного кислорода

в SAR дугах имеет среднее значение 400–450 км [3, 9]. В то же время высота максимальной скорости возбуждения эмиссии 630.0 нм в дуге потоком сверхтепловых электронов в область  $F_2$  ионосферы должна зависеть от высотного распределения плотности атомарного кислорода и коэффициента дезактивации возбужденных атомов  $O(^1D)$ . Известно значительное изменение высотного распределения плотности верхней нейтральной атмосферы в течение солнечного цикла. Мы сделали оценку вариаций плотности атомарного кислорода (O) по модели MSISE-90 для магнитно-спокойных дней в феврале в 2000 и 2008 гг. (для максимума и минимума 23 солнечного цикла) в локальную полночь на широте  $64^\circ$  с.ш. на меридиане Якутска. Было получено, что на высотах 350 и 450 км концентрация O уменьшалась в  $\sim 4$  и  $\sim 9$  раз, соответственно, в минимуме 23 солнечного цикла. Это дает основание полагать, что высота SAR-дуг вероятнее всего падает во время низкой солнечной активности.

По данным многолетних наблюдений на меридиане Якутска мы знаем, что в условиях низкой и средней магнитной активности ( $Dst \geq -50$  нТл;  $Kp \leq 3-4$ ) SAR-дуги наблюдаются на геомагнитных широтах  $55^\circ-60^\circ$  [14]. В 2018–2020 гг. мы выполнили триангуляционные измерения высоты красных дуг в минимуме 24 солнечного цикла по данным одновременных наблюдений субаврорального свечения на двух станциях. Также была определена высота дуг методом триангуляции в начале спада этого цикла в 2015 г. по данным наблюдений на одной станции и спутниковой регистрации  $Te$  пиков. В этой статье представлены первые результаты этих исследований.

#### МЕТОДЫ НАБЛЮДЕНИЙ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫСОТЫ SAR-ДУГ

Мониторинговые наблюдения субаврорального свечения и полярных сияний проводятся на оптической станции Маймага (MMG:  $63^\circ$  с.ш.,  $130^\circ$  в.д.) с исправленными геомагнитными координатами  $58^\circ$  CGMLat и  $202^\circ$  CGMLon для эпохи 2015 г. Станция располагается севернее на 1 градус широты г. Якутска ( $62^\circ$  с.ш.,  $130^\circ$  в.д.) на одном географическом меридиане. Полночь по магнитному локальному времени (MLT) на меридиане Якутска соответствует  $\sim 15:50$  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 камерой PI Acton ProEM 1024B и пяти полостными интерференционными фильтрами с полушириной полосы пропускания 2.0 нм. Фильтры центрированы на длины волн 557.7 и 630.0 [OI], 470.9 ( $N_2^+$ ), 486.1 (H $\beta$ ), 620.0 (континуум), 480.0 нм (континуум). Данные ASI

представлены в этой работе в виде кеограмм, а также отдельных изображений в проекции на поверхность Земли в исправленных геомагнитных координатах на основе моделей геомагнитного поля DGRF/IGRF.

В 2018 г. на авроральной станции Жиганск (ZGN:  $66.8^\circ$  с.ш.,  $123.4^\circ$  в.д.) с геомагнитными координатами  $62^\circ$  CGMLat и  $196^\circ$  CGMLon был установлен сканирующий вдоль меридиана цифровой фотометр для регистрации субаврорального свечения и сияний в эмиссиях 557.7 и 630.0 нм [15]. Для событий одновременных наблюдений SAR-дуг на двух станциях были определены высоты их нижней границы методом триангуляции. Для выполнения измерений строились меридиональные сканограммы станций Жиганск и Маймага по исходным данным с угловым шагом 0.5 и 0.17 градуса, соответственно.

Красные дуги обычно имеют протяженность 150–350 км вдоль меридиана и до  $\sim 400$  км по высоте. Поэтому определение высоты свечения в SAR-дуге по зенитным углам максимумов ее интенсивности на двух станциях дает не однозначные результаты, так как метод триангуляции применим к более локализованному источнику излучения. Например, этим методом проводились измерения высоты дискретных форм полярных сияний с линейными размерами от сотен метров до нескольких километров. Учитывая большие пространственные размеры красной дуги, мы выполнили триангуляционные измерения высоты ее нижней границы. Схема таких измерений на экваториальном крае дуги приведена на рис. 1а. Вычисления искомой высоты выполнялись по формулам (1) и (2):

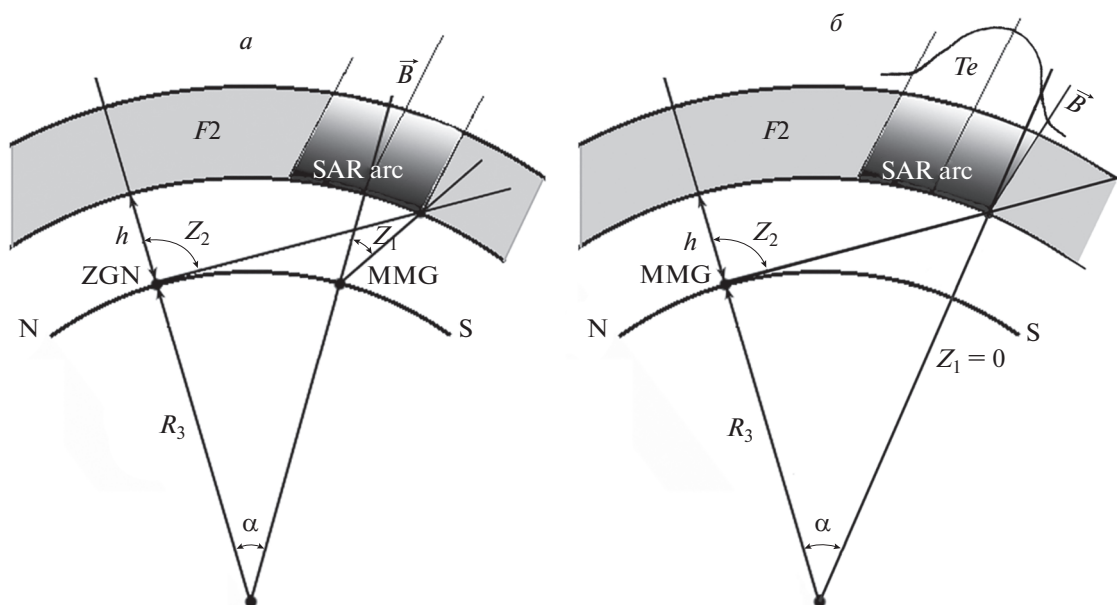
$$h := \left( \sqrt{c^2 + R^2 + 2cR \cdot \cos(z_1)} \right) - R, \quad (1)$$

$$c := \frac{2R \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot \cos\left(z_2 - \frac{\alpha}{2}\right)}{\sin(z_1 + z_2 - \alpha)}, \quad (2)$$

где:  $h$  – искомая высота,  $R$  – радиус Земли,  $\alpha$  – угол между станциями в градусах широты,  $z_1$  и  $z_2$  – зенитные углы регистрации нижней границы свечения на станциях Маймага и Жиганск, соответственно.

Формулы были выведены для схемы измерений с положением SAR-дуги в области широт между двумя станциями. Поэтому, в случае регистрации красной дуги экваториальнее этой области зенитный угол  $z_1$  определяется со знаком минус. В ситуации наблюдения дуги полярнее этого интервала широт будет отрицательным угол  $z_2$ . Между станциями Жиганск и Маймага угол  $\alpha = 3.8^\circ$ .

Схема показывает, что для зенитных углов больше  $z_1$  и  $z_2$  на двух станциях регистрируется фоновое свечение верхней атмосферы вне обла-



**Рис. 1.** Схемы определения высоты нижней границы свечения в SAR-дуге. Измерение высоты по данным одновременных наблюдений на двух станциях (а); по данным наблюдений на одной станции и одновременной регистрации  $T_e$  пика на спутнике (б).

сти SAR-дуги. При значениях углов меньше  $z_1$  и  $z_2$  начинается регистрация усиления свечения выше фонового уровня в области нижней границы красной дуги. На схеме в градациях серого условно показано увеличение интенсивности эмиссии 630 нм в дуге на высотах F2 слоя ионосферы. Такие же измерения можно выполнить на северном крае SAR-дуги, когда она наблюдается в окрестности зенита полярной станции.

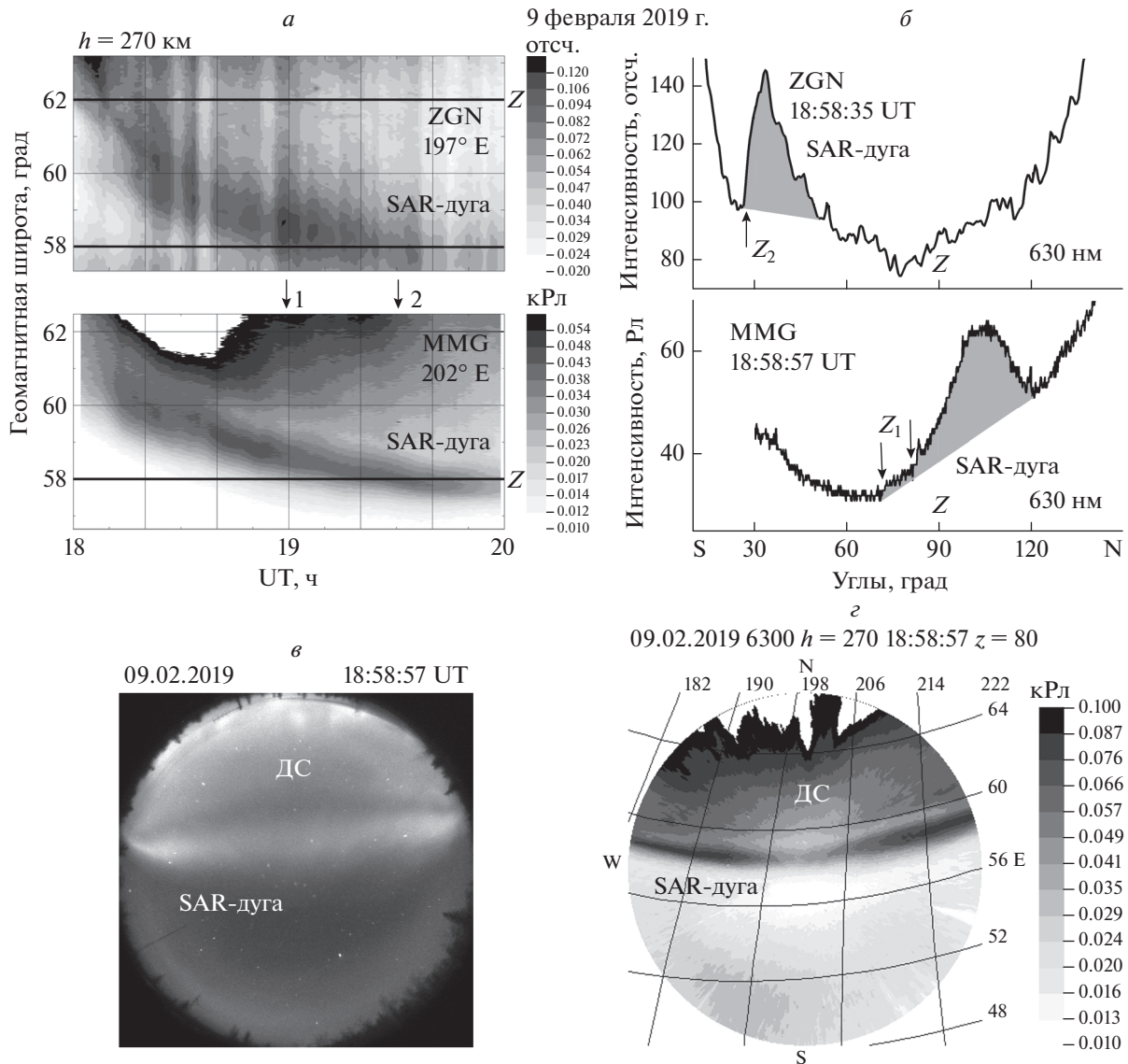
На рис. 1б приведена схема измерения высоты нижней границы свечения в дуге по одной наземной станции с использованием данных спутниковой регистрации  $T_e$  пика вблизи меридиана наблюдений. В этом методе угол  $\alpha$  определяется как разность между географическими широтами наземной станции и экваториальной (полярной) границы  $T_e$  пика. Также, зенитный угол  $z_1 = 0$  в выражениях (1) и (2). Измерения электронной температуры на спутниках DMSP с полярной орбитой выполняются значительно выше (~850 км) нижней границы свечения в SAR-дугах. Поэтому географическую широту экваториального (полярного) края  $T_e$  пика нужно предварительно определить на подобранной высоте нижней границы свечения в дуге посредством сопряжения вдоль силовой линии геомагнитного поля (см. рис. 1б). На этой высоте проекция на поверхность Земли границы свечения и  $T_e$  пика должны примерно совпадать (см. рис. 3б и 4б). В принципе, такое сопряжение двух границ позволяет определить высоту нижней границы свечения в красной дуге. Но более точно искомая высота вычисляется

по формулам (1) и (2) с использованием параметров  $\alpha$  и  $z_2$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ С ОПРЕДЕЛЕНИЕМ ВЫСОТЫ SAR-ДУГ

На рис. 2 представлен пример определения высоты SAR-дуги по данным одновременных наблюдений на станциях Жиганск и Маймага 9 февраля 2019 г. в минимуме 24 солнечного цикла. Кеограммы на рис. 2а в эмиссии 630.0 нм [OI] двух станций показывают экваториальное движение SAR-дуги в интервале геомагнитных широт  $62^\circ$ – $58^\circ$  от момента ее возникновения в окрестности границы ДС во время суббури. На кеограмме ст. Маймага в ~1930 UT (стрелка 2 на кеограмме) центр дуги регистрировался в окрестности зенита на широте  $58^\circ$ . Положение проекции дуги на поверхность Земли в зените станции наблюдений не зависит от ее высоты. Это дает возможность примерно определить высоту свечения в дуге как 270 км, при которой центр ее проекции на кеограмме ст. Жиганск также находится на этой широте.

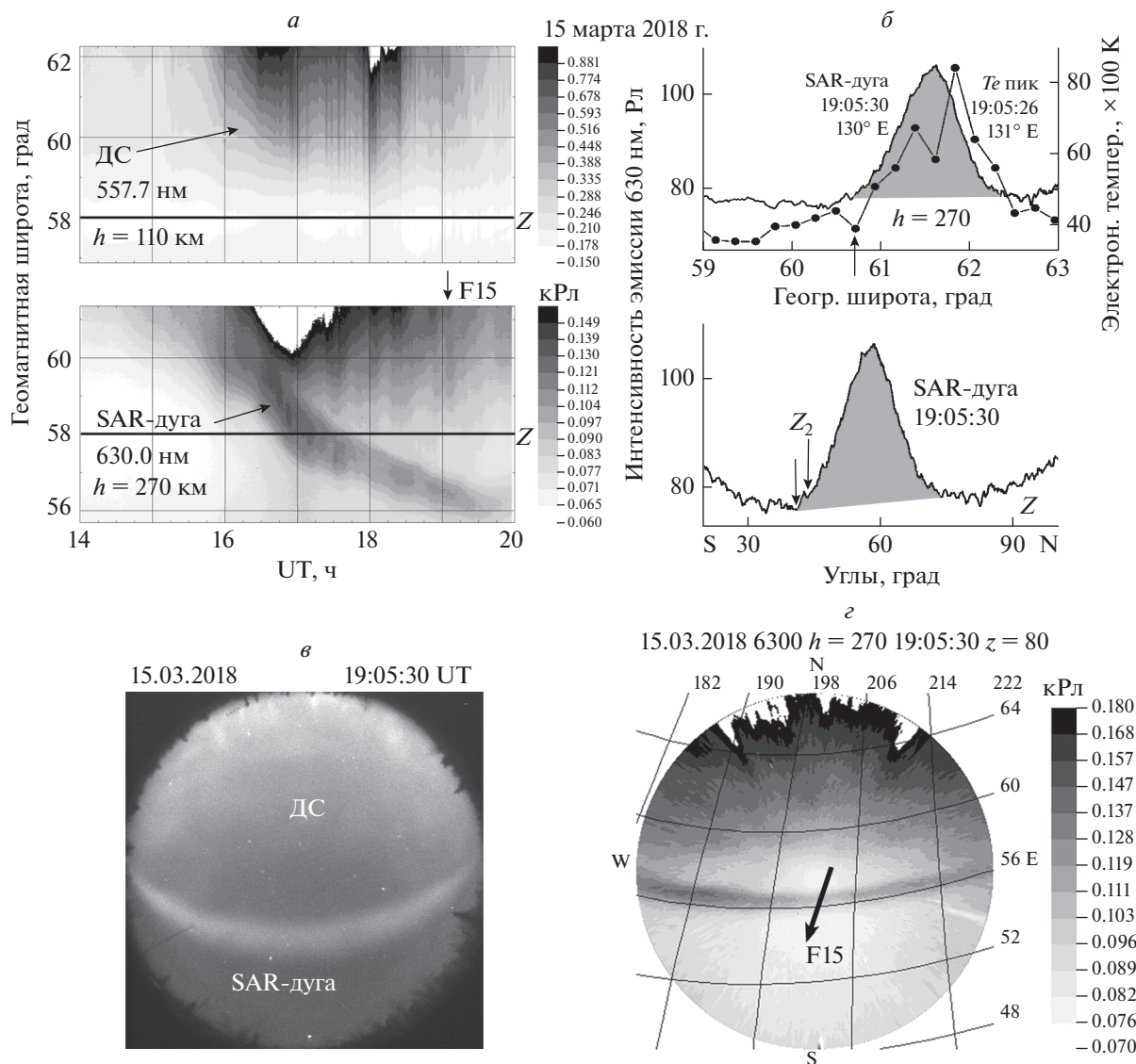
Далее, определим высоту нижней границы свечения в SAR-дуге более точно по сканограммам в эмиссии 630.0 нм [OI] двух станций в ~1858 UT на рис. 2б (стрелка 1 рис. 2а). Шкалы углов на рисунке приведены с началом отсчета от южного горизонта станций. На сканограмме ст. Жиганск стрелкой указан зенитный угол  $z_2$  экваториальной граница дуги, на которой начался резкий рост интенсивности красной линии атомарного



**Рис. 2.** Определение высоты SAR-дуги по наблюдениям на двух станциях 9 февраля 2019 г. Кеограммы в эмиссии 630.0 нм станций Жиганск (ZGN) и Маймага (MMG) в проекции на поверхность Земли для высоты свечения 270 км (а).  $Z$  – зенит станций; одновременные сканограммы SAR-дуги на двух станциях (б). Стрелками указаны отсчеты зенитных углов  $z_1$  и  $z_2$  на экваториальном крае дуги; оригинальное изображение (в автоконтрасте) всего неба в эмиссии 630.0 нм во время измерения высоты красной дуги (в); обработанное изображение в проекции на поверхность Земли для высоты свечения 270 км в исправленных геомагнитных координатах (г). Шкала интенсивности эмиссии в градациях серого приведена до 0.1 килорелея (кРл) для более детального отображения границы ДС и SAR-дуги.

кислорода. На ст. Маймага интенсивность красной дуги была  $\sim 35$  Релей. Экваториальный край дуги отмечен на двух зенитных углах  $z_1$  в начале плавного и резкого роста интенсивности. В данном случае два отсчета  $z_1$  определяют возможную ошибку измерения высоты на границе свечения. Таким образом, по формулам (1) и (2) при  $\alpha = 3.8^\circ$ ,  $z_2 = 63.0^\circ$  были получены высоты нижней границы свечения в SAR-дуге 257 и 292 км для отсчетов  $z_1 = -7.1^\circ$  и  $-17.1^\circ$ , соответственно. Среднее значение высоты составляет 274.5 км, что хорошо согласуется с заданной высотой красной ду-

ги на кеограммах двух станций (см. рис. 2а). Рассмотренный пример указывает на достоверность триангуляционных измерений согласно схеме на рис. 1а. Изображения всего неба в эмиссии 630.0 нм [OI] на рис. 2в и 2г показывают положение красной дуги в окрестности зенита ст. Маймага во время определения ее высоты. В западном и восточном направлениях интенсивность дуги увеличивается в следствие эффекта ван Райна. Красная дуга располагалась вблизи экваториальной границы ДС.

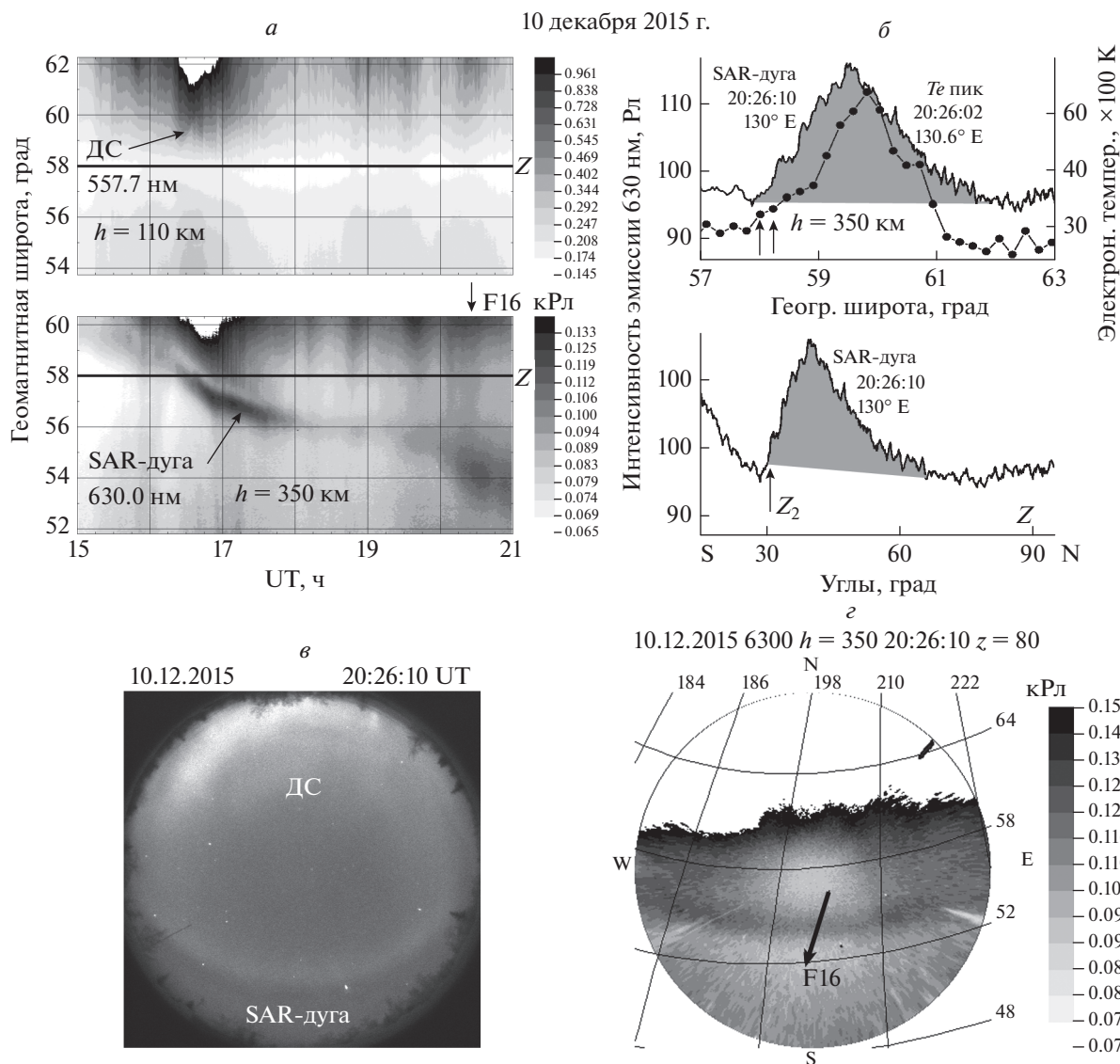


**Рис. 3.** Измерение высоты свечения в SAR-дуге по данным наблюдений на одной станции и спутниковой регистрации  $T_e$  пика 15 марта 2018 г. Кеограммы в эмиссиях 557.7 и 630.0 нм ст. Маймага в проекции на поверхность Земли для высот свечения 110 и 270 км, соответственно (а). Шкалы интенсивности эмиссий приведены в килореляях.  $Z$  – зенит станции; одновременные сканограмма SAR-дуги и измерения  $T_e$  пика в проекции на поверхность Земли для высоты 270 км (б). Стрелкой указана широта экваториального края дуги и  $T_e$  пика. Ниже, сканограмма дуги с двумя отсчетами угла  $z_2$  экваториального края дуги; как на рис. 2 (в); стрелкой показан проход спутника DMSP F15 через область красной дуги (г). Остальное как на рис. 2.

Рисунок 3 представляет событие с измерением высоты SAR-дуги по данным наблюдений на одной станции и спутниковой регистрации  $T_e$  пика 15 марта 2018 г. также во время минимума 24 цикла. Кеограммы ст. Маймага на рис. 3а показывают экваториальное расширение ДС в эмиссиях 557.7 и 630.0 нм [OI] до широты  $\sim 59^\circ$  во время усиления магнитосферной конвекции после поворота  $B_z$  ММП к югу (на рис. 3 не показано). С  $\sim 16$  UT началось формирование SAR-дуги в эмиссии 630.0 нм [OI] в окрестности границы ДС на геомагнитной широте  $\sim 60^\circ$ . Далее, красная ду-

га отделилась от ДС и двигалась к экватору через зенит станции наблюдений. В  $\sim 1905$  UT спутник DMSP F15 пересек SAR-дугу на высоте 853 км вблизи меридиана наблюдений (см. рис. 3г).

На рис. 3б экваториальные края SAR дуги и  $T_e$  пика в проекции на поверхность Земли примерно совпали на подобранной высоте 270 км (см. предыдущий раздел). Экваториальная граница  $T_e$  пика была определена с исходным широтным разрешением  $\sim 0.22^\circ$  по резкому подъему электронной температуры на  $\sim 1000$  К после отсчета, отмеченного стрелкой. На этой широте ( $60.72^\circ$ )



**Рис. 4.** Определение высоты свечения в SAR-дуге по данным наблюдений на одной станции и спутниковой регистрации *Te* пика 10 декабря 2015 г. Коеграммы как на рис. 3 (а). Высота красной линии – 350 км; как на рис. 3 для принятой высоты 350 км (б); как на рис. 3 (в); стрелкой показан проход спутника DMSP F16 через область красной дуги (г). Высота свечения 350 км. Остальное как на рис. 2 и 3.

начинается и более быстрый рост интенсивности эмиссии 630.0 нм в SAR-дуге. На сканограмме (нижняя панель рис. 3б) стрелками показаны два отсчета зенитного угла  $z_2$  на экваториальной границе красной дуги согласно схеме на рис. 1б. Два значения  $z_2$  обуславливают возможную ошибку определения высоты на границе свечения в этом случае. Подстановкой значений параметров  $\alpha = 2.3^\circ$ ,  $z_1 = 0$  в формулы (1) и (2) для нижней границы свечения в дуге были получены высоты ~244 и ~262 км при значениях  $z_2 = 48.0^\circ$  и  $46.0^\circ$ , соответственно. Среднее значение высоты составляет 253 км, что на 17 км (~6%) ниже полученной высоты при сопряжении границ *Te* пика и ду-

ги. Интенсивность красной линии атомарного кислорода в дуге во время определения высоты была ~30 Релей. Оригинальное и обработанное изображения всего неба в эмиссии 630.0 нм [OI] на рис. 3в и 3г показывают положение красной дуги относительно ДС во время определения ее высоты. Интенсивность дуги в окрестности меридиана станции наблюдений падает в следствие эффекта ван Райна.

Событие наблюдений SAR-дуги на ст. Маймага 10 декабря 2015 г. вблизи максимума 24 солнечного цикла приведено на рис. 4. Определение высоты свечения в дуге было выполнено также с использованием спутниковой регистрации *Te* пика.

**Таблица 1.** Результаты определения высоты нижней границы свечения в SAR-дугах на меридиане Якутска

Дата наблюдений дд.мм.гг.	Метод определения высоты	Высота нижней границы, км	Минимум SYM-H, нТл	Фаза солнечного цикла
16.11.2015	1 ст. + $T_e$ пик	352–360	–45	Максимум
10.12.2015	1 ст. + $T_e$ пик	349–367	–10	Максимум
15.03.2018	1 ст. + $T_e$ пик	244–262	–30	Минимум
09.02.2019	2 станции	257–292	–15	Минимум
21.12.2020	2 станции	242–273	–10	Минимум

(2 станции) – триангуляционные измерения высоты свечения в дуге по данным одновременных наблюдений на двух станциях; (1 ст. +  $T_e$  пик) – определение высоты свечения методом триангуляции по данным наблюдений на одной станции и спутниковой регистрации  $T_e$  пика.

Кеогаммы ст. Маймага на рис. 4а показывают экваториальное расширение ДС в эмиссиях 557.7 и 630.0 нм [OI] во время суббури. С ~1615 UT началось формирование SAR-дуги в эмиссии 630.0 нм в окрестности границы ДС. Далее, красная дуга отделилась от ДС и двигалась к экватору через зенит станции наблюдений.

В ~2026 UT спутник DMSP F16 пересекает SAR-дугу на высоте 857 км вблизи меридиана оптических наблюдений (см. рис. 4з). В этом случае экваториальные края SAR-дуги и  $T_e$  пика в проекции на поверхность Земли совпали на подобранной высоте 350 км, как показано на рис. 4б (верхняя панель). Рост интенсивности дуги на экваториальном крае неравномерен, поэтому для определения широты общей границы было взято два значения по отсчетам электронной температуры с интервалом 0.22° (показаны стрелками). На сканограмме (нижняя панель) указан зенитный угол  $z_2$  резкой экваториальной границы дуги согласно схеме на рис. 1б. По формулам (1) и (2) с установленными параметрами  $z_1 = 0$ ,  $z_2 = 59.85^\circ$  были получены высоты нижней границы свечения в дуге ~367 и ~349 км при значениях  $\alpha = 5.0^\circ$  и  $4.78^\circ$ , соответственно. Среднее значение высоты равно ~358 км, что незначительно выше подобранной высоты при сопряжении границ  $T_e$  пика и дуги. Интенсивность свечения в дуге во время определения высоты была ~20 Релей. Изображения всего неба в эмиссии 630.0 нм на рис. 4в свидетельствуют о регистрации слабой SAR-дуги. Обработанное изображение на рис. 4г показывает положение красной дуги на геомагнитной широте  $53^\circ$ – $55^\circ$  во время определения ее высоты. Распределение интенсивности эмиссии 630.0 нм в дуге вдоль параллели также определяется эффектом ван Райна.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Мы рассмотрели данные для трех событий наблюдения SAR-дуг и получили высоту нижней границы свечения на их экваториальном крае. Кроме этого, вблизи максимума 24-го солнечного

цикла была определена высота свечения в событии 16 ноября 2015 г. по данным наблюдений на станции Маймага и регистрации  $T_e$  пика на спутнике SWARM-B. Во время минимума солнечной активности было также выполнено измерение высоты нижней границы свечения в дуге по данным наблюдений на станциях Маймага и Жиганск 21 декабря 2020 г. В табл. 1 приведены все пять случаев определения высоты нижней границы излучения красной линии атомарного кислорода в SAR-дуге. Значения индекса SYM-H в таблице свидетельствуют о низком уровне буревой магнитной активности в рассмотренных событиях. Измеренные высоты показывают, что во время минимума 24 солнечного цикла нижняя граница свечения в дугах была ниже на ~100 км чем в максимуме. Средние значения этого параметра равны ~260 и ~360 км для минимума и максимума, соответственно. Уменьшение высоты красных дуг в годы минимума, наиболее вероятно, обусловлено значительным падением плотности верхней нейтральной атмосферы согласно модели MSISE-90. Для подтверждения этого вывода мы планируем проведение одновременных наблюдений SAR-дуг на двух станциях в годы максимума 25 солнечного цикла.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1) Рассмотрены схемы измерения высоты нижней границы свечения на южном (северном) крае SAR-дуги методом триангуляции, в том числе с использованием спутниковой регистрации  $T_e$  пика. 2) Выполнены триангуляционные измерения высоты нижней границы свечения по наблюдениям на двух станциях в 2018–2020 гг. В минимуме 24 солнечного цикла получены значения высоты в интервале 240–290 км. 3) Измерены высоты нижней границы свечения в красной дуге методом триангуляции по наблюдениям на одной станции и данных спутниковой регистрации  $T_e$  пика. Вблизи максимума 24 цикла в 2015 г. были получены высоты в интервале 350–370 км. 4) Высота нижней границы свечения в SAR-дугах вероятнее всего изменяется в течение цикла солнеч-

ной активности как следствие вариаций плотности верхней атмосферы согласно модели MSISE-90.

Вычисления по модели MSISE-90 были выполнены на сайте UK Solar System Data Centre (<http://www.wdc.rl.ac.uk/wdcc1/msis.html>). Данные измерений электронной температуры и ионосферного дрейфа на спутниках DMSP F15,16 из Space Sciences at the University of Texas at Dallas были получены в Madrigal database (<http://cedar.openmadrigal.org/single/>). Исправленные геомагнитные координаты рассчитывались в NASA service (<https://omniweb.sci.gsfc.nasa.gov/vitmo/cgm.html>). Геомагнитные индексы были получены в WDC C2 for Geomagnetism, Kyoto (<http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html>).

Работа выполнена в рамках темы государственного задания (номер гос. регистрации № 122011700172-2) при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 21-55-50013ЯФ\_a).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rees M.H., Akasofu S.* // Planet. Space Sci. 1963. V. 11. No. 1. P. 105.
2. *Зайцева С.А., Пудовкин М.И., Дряхлов В.В., Дьяченко В.Н.* // Геомагн. и аэроном. 1971. Т. 11. № 5. С. 853.
3. *Kozyra J.U., Nagy A.F., Slater D.W.* // Rev. Geophys. 1997. V. 35. No. 2. P. 155.
4. *Cole K.D.* // J. Geophys. Res. 1965. V. 70. No. 7. P. 1689.
5. *Cole K.D.* // Ann. Geophys. 1970. V. 26. No. 1. P. 187.
6. *Cornwall J.M., Coroniti F.V., Thorne R.M.* // J. Geophys. Res. 1971. V. 76. No. 19. P. 4428.
7. *Horwitz J.L., Brace L.H., Comfort R.H., Chappell C.R.* // J. Geophys. Res. 1986. V. 91. No. A10. Art. No. 11203.
8. *Shiokawa K., Miyoshi Y., Brandt P.C. et al.* // J. Geophys. Res. 2013. V. 118. No. 1. P. 256.
9. *Mendillo M., Baumgardner J., Wroten J.* // J. Geophys. Res. Space Phys. 2016. V. 121. No. 1. P. 245.
10. *Martinis C., Baumgardner J., Mendillo M. et al.* // J. Geophys. Res. Space Phys. 2019. V. 124. No. 6. P. 4658.
11. *Иевенко И.Б.* // Геомагн. и аэроном. 1993. Т. 33. № 5. С. 42; *Ievenko I.B.* // Geomagn. Aeron. 1994. V. 33. No. 5. P. 599.
12. *Иевенко И.Б.* // Геомагн. и аэроном. 1995. Т. 35. № 3. С. 37; *Ievenko I.B.* // Geomagn. Aeron. 1995. V. 35. No. 3. P. 331.
13. *Иевенко И.Б.* // Геомагн. и аэроном. 1999. Т. 39. № 6. С. 26; *Ievenko I.B.* // Geomagn. Aeron. 1999. V. 39. No. 6. P. 697.
14. *Иевенко И.Б., Алексеев В.Н.* // Геомагн. и аэроном. 2004. Т. 44. № 5. С. 643; *Ievenko I.B., Alekseev V.N.* // Geomagn. Aeron. 2004. V. 44. No. 5. P. 592.
15. *Ievenko I.B., Parnikov S.G., Alexeyev V.N.* // Adv. Space Res. 2008. V. 41. No. 8. P. 1252.
16. *Иевенко И.Б., Парников С.Г.* // Геомагн. и аэроном. 2020. Т. 60. № 6. С. 751; *Ievenko I.B., Parnikov S.G.* // Geomagn. Aeron. 2020. V. 60. No. 6. P. 737.
17. *Ievenko I.B.* // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 2020. V. 209. Art. No. 105386.
18. *Иевенко И.Б., Парников С.Г.* // Геомагн. и аэроном. 2022. Т. 62. № 2. С. 171; *Ievenko I.B., Parnikov S.G.* // Geomagn. Aeron. 2022. V. 62. No. 1–2. P. 32.

### Relationship of the stable auroral red arcs height to solar activity. The observation results at the Yakutsk meridian

**I. B. Ievenko<sup>a</sup>\*, S. G. Parnikov<sup>a</sup>, A. V. Sokolnikov<sup>a</sup>**

<sup>a</sup> *Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, 677027 Russia*

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

We presented the first results of triangulation measurements of the stable auroral red arcs height at the Yakutsk meridian in 2015–2020. The heights of the lower luminosity boundary in arcs of 350–370 km near the maximum and 250–290 km during the minimum of solar activity in the 24th cycle are obtained. The decrease of the red arcs height in the minimum years is due to the significant density decrease of the upper neutral atmosphere.