

DOI: 10.51981/2588-0039.2024.47.029

СРЕДНЕШИРОТНЫЕ И СУБАВРОРАЛЬНЫЕ КРАСНЫЕ ДУГИ СВЕЧЕНИЯ АТМОСФЕРЫ

В.Л. Халипов¹, А.Е. Степанов²

¹Институт космических исследований РАН, Москва; e-mail: khalipovvictor@mail.ru

²Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера ЯНЦ СО РАН, Якутск;
e-mail: a_e_stepanov@ikfia.ysn.ru

Аннотация

В работе рассмотрены экспериментальные данные, характеризующие красные дуги в области субавроральных широт. Установлено, что они имеют другую физическую природу по сравнению с хорошо известными «классическими» красными дугами, которые наблюдаются на средних широтах и вызваны ионно-циклотронной неустойчивостью энергичных ионов кислорода и водорода кольцевого тока. «Классические» красные дуги наблюдаются на восстановительной фазе больших магнитных бурь.

Субавроральные красные дуги возникают при суббуревой активности и могут наблюдаться на любой фазе магнитной бури. Эти дуги развиваются в полосе поляризованного джета. В них, в отличие от «классических» красных дуг существует сильное электрическое поле, направленное на север в среднем 20-40 мВ/м, которое разогревает среду и порождает быстрый продольный и поперечный дрейф плазмы со скоростями до 1.5 - 2.0 км/с, согласно измерениям спутников DMSP на высоте 850 км.

По параллактическим сканерным измерениям высота максимума свечения субавроральной красной дуги составляет 180-200 км. Интерферометрические измерения показывают, что в полосе красной дуги температура нейтральной атмосферы [Tn] повышена до 1200-1450 К относительно среднего уровня, определенного по невозмущенным дням месяца [около 1000 К].

Введение

Красные дуги свечения верхней атмосферы были открыты французским астрономом в период МГТ 1957 - 1959 гг. [Barbier, 1958]. Свечение атмосферы, обнаруженное им в линии 630 нм, было бесструктурным и стабильным в течение многих часов и охватывало долготы от горизонта до горизонта. При этом обычные формы полярных сияний наблюдались далеко к северу относительно красных дуг. Были выполнены многочисленные измерения, которые показали, что интенсивность свечения составляла 300 – 3000 Рл, но могла достигать десятков кРл. Свечение зеленой линии атомарного кислорода регистрировалось, но было на два порядка менее интенсивным.

В следующем цикле солнечной активности последовали параллактические и интерферометрические измерения красных дуг, которые показали, что максимум свечения расположен на высоте 450 км. [Roach and Roach, 1963], и температура нейтральной атмосферы [Tn] под дугой не изменяется [Roble et al., 1970]. Измерения на спутнике OGO-4 [Reed and Blamont, 1968] не обнаружили электрического поля в полосе красной дуги. Все эти измерения были выполнены на средних широтах и соотнесены с фазой восстановления магнитных бурь большой интенсивности. В ИКФИА свечение ночного неба на субавроральных широтах исследуется с начала 70-х годов. В работе [Алексеев и др., 1975] проанализированы параллактические измерения с трех и четырех пунктов сканерных наблюдений и установлено, что высоты максимума в диффузной полосе свечения в линии 630.0 нм составляют 180-200 км. В обсерватории Маймага (L = 3.2) проводились интерферометрические измерения Tn, комплексные оптические и ионозондовые измерения.

В детальном исследовании субвизуального фонового свечения атмосферы на субавроральных широтах [Фельдштейн и др., 2012] обоснована точка зрения, что источником свечения субавроральных красных дуг являются остаточные высыпания электронов из силовых трубок на экваториальной границе электронного плазменного слоя. Механизм образования классической красной дуги был разработан в статье [Cornwall et al., 1971]. Энергичные ионы кольцевого тока в приэкваториальной области магнитосферы возбуждают ионно-циклотронные волны, которые ускоряют электроны среды вследствие действия механизма затухания Ландау. Возникшая популяция сверхтепловых электронов передает энергию в атмосферу, порождая красную дугу. Выяснилось, что этот механизм действительно работает, наблюдаемая интенсивность ионно-циклотронных гармоник способна создать свечение красной линии интенсивностью 0.5 - 3.0 кРл [Kozyra et al., 1987].

Экспериментальные результаты

Интерферометрические измерения T_n в области красной дуги были проведены во время большой магнитной бури 30 октября - 1 ноября 1968 года на средних широтах. Максимальное значение индекса $Dst = -224$ нТл. Интенсивность свечения линии 630.0 нм изменялась на протяжении времени измерения в пределах 100-600 R [Roble *et al.*, 1970]. Сканирующие спектрометрические наблюдения не регистрируют подъема интенсивности зеленой линии кислорода 557.7 нм в красной дуге. На Рис. 1 показаны вариации температуры нейтральной атмосферы в пределах красной дуги (заполненные кружки) и вне области дуги (незаполненные квадраты). Крестиками обозначены измерения T_n за другой период 31 октября - 1 ноября, когда также наблюдалась красная дуга. Как можно видеть температура нейтральной атмосферы в полосе дуги не изменяется. Авторы делают вывод, что в случае разогрева среды сильным электрическим полем и селективным тепловым возбуждением свечения, как это было предложено в работе [Megill *et al.*, 1963], должно было наблюдаться и повышение температуры нейтральной атмосферы. В другом событии красной дуги на средних широтах по измерениям спутника OGO-4 не было обнаружено электрического поля в полосе красной дуги [Reed and Blamont, 1968].

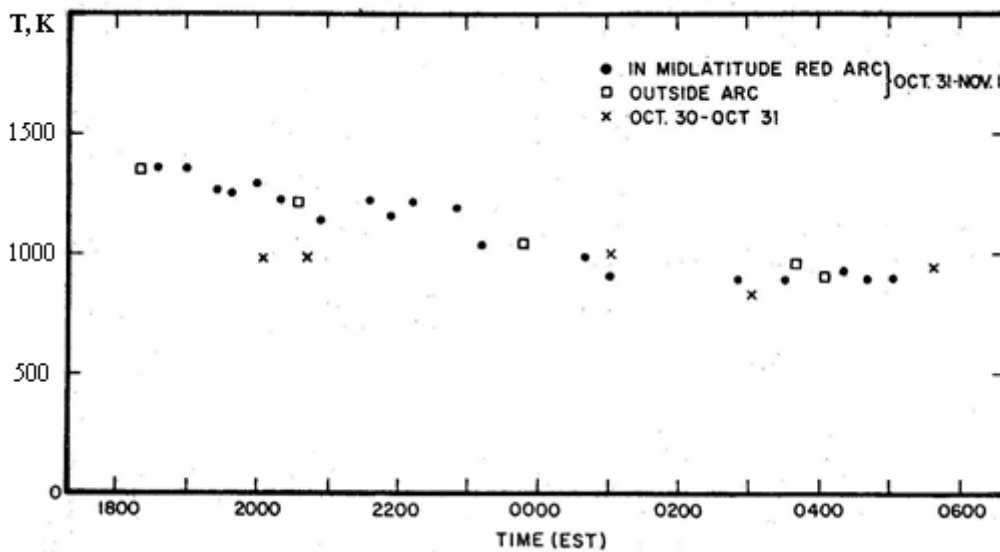


Рисунок 1. Интерферометрические измерения температуры нейтральной атмосферы в красной дуге 30 - 31 октября 1968 г. [Roble *et al.*, 1970].

Рассмотрим результаты комплексных измерений в субавроральной ионосфере во время суббуревого возмущения 25 февраля 1990 г. (Рис. 2). Наблюдения были выполнены на геофизическом полигоне Якутск ($L = 3.0$) и Маймага ($L = 3.2$).

В верхней панели рисунка показана широтная динамика красной дуги по данным сканирующего спектрометра. Ломаной линией обозначены вариации интенсивности свечения в дуге, которая возникла в 11.30 UT. На второй панели отображены измерения с помощью интерферометра Фабри-Перо температуры нейтральной атмосферы относительно среднего уровня 1000 К, определенного по невозмущенным дням месяца. Нижняя панель иллюстрирует изменения ионосферных параметров. Кружками помечены критические частоты регулярного слоя F2. Треугольники показывают частоты спорадической структуры F3s, которая возникает в полосе поляризационного джета. Время начала роста T_n и время возникновения поляризационного джета 10.30 UT опережают на один час появление красной дуги. На протяжении всего времени измерений температура нейтральной атмосферы повышена на 100-200 К относительно значений, наблюдаемых в невозмущенных условиях.

На Рис. 3 показан один из примеров оптических и ионосферных измерений 5 марта 1989 года. В верхней части рисунка представлены фотометрические измерения положения и интенсивности красной дуги. В нижней части рисунка показаны значения критических частот спорадической структуры F3s и регулярного слоя F2 и приведены отрезки времени регистрации F3s отражений и F2s наклонных отражений от полярной стенки провала. Красная дуга была обнаружена в 11.30 UT в зените станции Маймага сразу после начала наблюдений. В 13.00 UT произошло смещение дуги в экваториальном направлении, связанное с возросшим уровнем суббуревой активности. По ионосферным измерениям в 11.15 UT критические частоты в области F2 резко уменьшились с 6.8 до 3.8 МГц. и возникли F3s отражения, характерные для развития структуры поляризационного джета [Galperin *et al.*, 1986]. В течение времени 13.15 UT - 20.00 UT наблюдались наклонные отражения от полярной кромки провала и ст. Якутск находилась в области главного ионосферного

провала вблизи его полярной стенки. Такие детальные сопоставления красных дуг с ионосферными структурами были рассмотрены для 23 событий. Во время 18 случаев развития красной дуги им сопутствовало развитие F3s отражений. При очень низких значениях критической частоты F2 слоя, F3s структура не развивалась, а наблюдалась сильная диффузность F2 слоя.

Параллактические измерения высот классической красной дуги приведены в работе [Roach and Roach, 1963]. Нижняя граница дуги располагается на высоте 350 км, а максимум свечения дуги приходится на высоту 400 км. На цепочке четырех измерительных пунктов в Якутии проводились параллактические измерения высоты максимума полосы красного свечения. Был выполнен анализ данных по 59 случаям наблюдения и установлено, что максимум располагается в диапазоне высот 180-200 км [Алексеев, 1975].

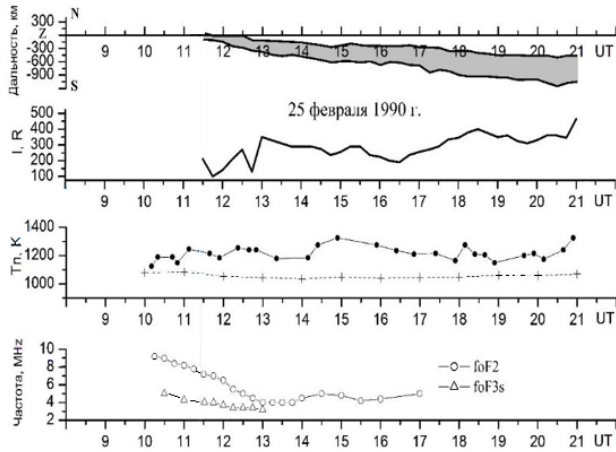


Рисунок 2. Оптические и ионосферные измерения 25 февраля 1990 г. на ст. Маймага и Якутск.

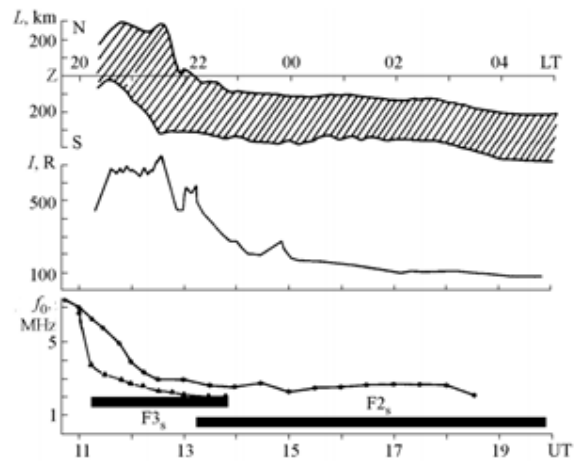


Рисунок 3. Оптические и ионосферные измерения 3 марта 1989 г. на ст. Маймага и Якутск.

Обсуждение результатов

Измерения с помощью интерферометра Фабри-Перо в полосе красной дуги на субавроральных широтах показывают возрастание температуры нейтральной атмосферы на 200 К относительно среднего уровня, определенного по невозмущенным дням месяца (Рис. 2). В случае более длительных и интенсивных возмущений T_n может повышаться на 400 К. Всего имеется пять событий при которых имеются измерения T_n в полосе красной дуги и во всех наблюдается значительное возрастание температуры нейтральной атмосферы [Alexeyev et al., 1994]. В работах [Okano et al., 1985; Okano and Kim, 1987] также было установлено повышение T_n в области красной дуги на субавроральных широтах. Плотность нейтральной атмосферы на высотах F-области превышает 10⁸ см⁻³ и необходим приток энергии в десятки эрг/см², чтобы вызвать наблюдаемое повышение T_n. Для возбуждения свечения в несколько сот Рэлей достаточно потока энергии в 0.1 эрг/см². Как показано на Рис. 1, температура нейтральной атмосферы в области красной дуги не изменяется. Поток сверх тепловых электронов в области диссипации энергии кольцевого тока способен только возбудить свечение красной линии кислорода интенсивностью до 2.5 - 3.0 кРл.

В работе [Galperin et al., 1986] были проведены сопоставления синхронных измерений поляризационного джета (PJ) со спутников и структуры ионосферы по регистрации ионограмм на станциях Якутской цепочки ионозондов. Было установлено, что развитие PJ приводит к формированию характерных следов отражений F3s на ионограммах, которые имеют критические частоты меньше, чем фоновый слой F2 и большую высоту. На основании этого можно сделать вывод, что приведенные на Рис. 2 и Рис. 3 результаты свидетельствуют о том, что субавроральная красная дуга развивается в полосе поляризационного джета. Дуга расположена в области провала ионизации, к экватору от диффузной авроральной зоны.

Высота максимума свечения «классической» красной дуги составляет 400 км [Roach and Roach, 1963]. Многочисленные параллактические измерения высот полосы красного свечения, проведенные на сети пунктов на субавроральных широтах в Якутии [Алексеев и др., 1975], показали, что высота максимума свечения составляет 180-200 км.

При сильных суббуревых возмущениях субавроральные красные дуги могут существовать много часов и перемещаться в экваториальном направлении в после полуночные часы на тысячу километров, вплоть до границы регистрации ст. Маймага [Иевенко, 1993, 1999]. Используя только спектрометрические сканерные наблюдения и регистрацию камер всего неба субавроральные красные дуги невозможно отличить от

«классических» красных дуг без параллактических измерений высоты свечения дуги или интерферометрических измерений Тп.

По измерениям высыпающихся мягко-энергичных электронов со спутников DMSP над субавроральной красной дугой было показано, что остаточные высыпания электронов имеют достаточную интенсивность и могут создавать существенный вклад в свечение субавроральной красной дуги [Зверев и др., 2012]. Такой же вывод был сделан и по сканерным спектроскопическим измерениям со ст. Михнево под Москвой и сопоставлении их с регистрацией высыпаний электронов на спутниках DMSP [Gorely and Karakchiev, 2003]. Содержащиеся в настоящей работе результаты показывают, что субавроральная красная дуга формируется в полосе поляризационного джета, где электронная концентрация понижена на порядок и, соответственно, резко падает дезактивация возбужденных атомов кислорода. Сильное электрическое поле PJ производит разогрев среды и подъем температуры нейтральной атмосферы. Кроме того происходит существенное возбуждение линии 630.0 нм. [Sazykin et al., 2002]. Рассмотренные факторы приводят к формированию субавроральной красной дуги.

Выводы

1. Субавроральная красная дуга формируется в полосе поляризационного джета при развитии аврорального возмущения.
2. По измерениям интерферометра Фабри-Перо температура нейтральной атмосферы в области субавроральной красной дуги повышена на 200 - 400 К относительно среднего уровня, определенного по невозмущенным дням месяца.
3. Высота максимума свечения субавроральной красной дуги составляет 180 - 200 км.

Литература

- Алексеев В.Н., Величко В.А., Надубович Ю.А. Исследование высот свечения и положения южной границы фонового свечения 6300 Å // Физика верхней атмосферы высоких широт. Якутск. Изд. ЯФ СО АН СССР. Вып. 3. С. 124–133. 1975.
- Зверев В.Л., Фельдштейн Я.И., Воробьев В.Г. Авроральное свечение к экватору от овала полярных сияний // Геомагнетизм и Аэронаука. Т. 52. № 1. С. 64–72. 2012.
- 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. Воздействие магнитосферной активности на плазмосферу по наблюдениям диффузного свечения и SAR-дуги // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 39. № 6. С. 26–32. 1999.
- Alexeyev V.N., Ievenko I.B., Yugov V.A., Ignat'ev V.M., Khalipov V.L. Complex photometric, interferometric and ionospheric measurements in the SAR-arc observation region // *Geomagnetism and Aeronomy*. V. 39. № 5. P. 63–68. 1994.
- Barbier D. The auroral activity at low latitude // *Ann. Geophys.*, V. 14. P. 314–340. 1958.
- Cornwall J.M., Coronity F.V., Thorne R.M. Unified theory of SAR arc formation at the plasmapause // *J. Geophys. Res.* V. 76. P. 4428–4445. 1971.
- Galperin Yu. I., Khalipov V.L., Filippov V.M. Signature of rapid subauroral ion drifts in the high-latitude ionosphere structure // *Ann. Geophys.* V. 4. P. 145–154. 1986.
- Gorely K.I., Karakchiev V.D. Dynamics of SAR-arcs from observations by a scanning photometer on the Mikhnevo observatory // *Proceedings of IDG RAS “Geophysical Processes in the Lower and Upper Shells of the Earth”, Book 2*, P. 167–178. 2003.
- Kozyra J.U., Nagy A.F., Slater D.W. High-altitude energy source[s] for stable red arcs // *Rev. Geophys.* V. 35. P. 155–190. 1997.
- Megill L.R., Rees M.H., Droppelman L.K. Electric fields in the ionosphere and the excitation of the red lines of atomic oxygen // *Planet. Space Sci.* V. 11. P. 45–56. 1963.
- Okano S., Kim J.S., Ichikawa T. Measurements of thermospheric response to auroral activities // *Planet. Space Sci.* V. 33 [7]. P. 841–845. 1985.
- Okano S., Kim J.S. Observations of a SAR-arc associated with an isolated magnetic substorm // *Planet. Space Sci.* V. 35 [4]. P. 475–482. 1987.
- Roach F.E., Roach J.R. Stable 6300 Å auroral arcs in mid-latitudes // *Planet. Space Sci.*, V. 11. P. 523–540. 1963.
- Roble R.G., Hays P.B., Nagy A.F. Photometric and interferometric observations of a mid-latitude stable auroral red arc // *Planet. Space Sci.* V. 18 [3]. P. 431–439. 1970.
- Read E., Blamont J.E. OGO 4 observations of the September 1967 M-arc // *Trans. AGU*, 1968.
- Sazykin S., Fejer B.G., Galperin Yu. I., Zinin L.V., Grigoriev S.A., Mendillo M. Polarization jet events and excitation of weak SAR arcs // *Geoph. Res. Lett.* V.29. No. 12. P. 261–264. 2002.