

УДК 550.338. 1

## АВРОРАЛЬНОЕ СВЕЧЕНИЕ К ЭКВАТОРУ ОТ ОВАЛА ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЙ

© 2012 г. В. Л. Зверев<sup>1</sup>, Я. И. Фельдштейн<sup>2</sup>, В. Г. Воробьев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Учреждение РАН Полярный геофизический институт КНЦ РАН, г. Апатиты (Мурманская обл.)

<sup>2</sup> Учреждение РАН Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова, г. Троицк (Московская обл.)

e-mail: zverev@pgia.ru

Поступила в редакцию 22.02.2011 г.

После доработки 24.06.2011 г.

По визуальным наблюдениям за период МГГ (визоплотам) показано, что во время магнитных бурь диффузное свечение регистрируется на всех широтах между наиболее низкой широтой визуально наблюдаемого аврорального свечения в зените и овалом полярных сияний. Область диффузного свечения пространственно совпадает с областью мягких электронных вторжений, простирающихся к экватору от границы овала до широты проекции плазмопаузы вдоль магнитных силовых линий на ионосферу. Используя опубликованные материалы о динамике диффузного свечения и SAR-дуг на якутском меридиане и одновременные измерения спутника DMSP F9, обсуждается вклад вторжений низкоэнергичных электронов, переносимых конвекцией к Земле из плазменного слоя магнитосферы, в возбуждение эмиссии 630.0 нм в SAR-дугах низкой (<1.0 kR) интенсивности.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Яркие и подвижные дискретные формы полярных сияний в высоких широтах наблюдаются практически непрерывно, окружая геомагнитный полюс и располагаясь вдоль овала полярных сияний [Фельдштейн, 1960, 1963; Хорошева, 1962]. Обычно в дискретных формах сияний наиболее интенсивной является зеленая линия атомарного кислорода (OI) 557.7 нм. К средним широтам частота появления дискретных форм резко уменьшается. В период МГГ (1957–1959 гг.) основным методом наблюдений сияний в средних широтах являлись визуальные, проводившиеся на многих сотнях метеорологических станций. Результаты их систематической обработки в Международных центрах данных опубликованы в закодированном виде в *Анналах МГГ* [Annals IGY, 1964]. Интенсивное авроральное свечение регистрируется на средних широтах в интервалы магнитных возмущений, сопровождая развитие магнитных бурь [Chapman, 1957]. К экватору от овала существует протяженная полоса субвизуального свечения атмосферы [Sandford, 1968; Lui et al., 1973]. Эта полоса с трудом различима визуально из-за слабой контрастности свечения по небосводу, зачастую низкой интенсивности и слабой чувствительности глаза к основной эмиссии в этом свечении — красному дублету (OI) 630.0–636.4 нм [Красовский, 1967]. Зеленая эмиссия хотя и существует, но крайне ослаблена. Отношение интенсивностей эмиссий  $I_{6300}/I_{5577} \sim 2-4$ . Из-за своей особен-

ности — отсутствия в свечении на больших площадях отчетливо выраженных структур, оно получило название диффузного. Интенсивность диффузного свечения убывает с уменьшением широты и возрастает в магнитно-возмущенные интервалы [Akasofu and Chapman, 1962; Красовский, 1967]. По данным параллактических наблюдений на меридиональной цепочке станций Якутск–Тикси [Алексеев и др., 1975] высота максимума фонового свечения в эмиссии 630.0 нм охватывала интервал высот от 140 до 317 км. Обычно экваториальная граница диффузного свечения относительно гладкая, однако во время сильных геомагнитных возмущений на ней могут появляться крупномасштабные волнообразные структуры. Амплитуда и длина волны меняются со временем, в среднем длина волны составляет 400 км [Lui et al., 1982].

К экватору от диффузного свечения в средних широтах наблюдается резкое усиление интенсивности монохроматической эмиссии 630.0 нм, получившее название М-дуг [Roach and Roach, 1963] или SAR (Stable Auroral Red) — дуг [Rees and Roble, 1975]. SAR-дуги являются одним из типов аврорального свечения, так как их появление обычно связано с усилением геомагнитной активности, а расположение — с геомагнитным полем. Отличительными особенностями SAR-дуг являются: длительное, до 10 часов, существование (отсюда и термин устойчивые); расположение вдоль  $L$ -оболочек дрейфов энергичных заря-

женных частиц в геомагнитном поле; протяженность в несколько тысяч километров по долготе; расположение на низкой (~42°) геомагнитной широте во время интенсивных магнитных бурь; практически монохроматическое излучение эмиссии 630.0 нм (отношение  $I_{630.0}/I_{557.7} \sim 50$ ) на высоте ~400–450 км; сопряженность в северном и южном полушариях. Интенсивность SAR-дуг в период МГГ составляла несколько kR (килоРэ-лей) [Marovich and Roach, 1963], во время очень интенсивных магнитных бурь может достигать десятков kR [Barbier, 1960]. Так, во время магнитной бури 21 сентября 1957 г. ( $Dst = -250$  нТл) зарегистрировано увеличение интенсивности эмиссии 630.0 нм до 125 kR, а в эмиссии 557.7 нм до 1.5 kR [Barbier, 1960]. Таким образом, отношение интенсивностей  $I_{630.0}/I_{557.7}$  составило ~80. Между SAR-дугами и границей овала существует разрыв по широте, достигающий ~14°, в котором идентифицировано свечение с интенсивностью на уровне свечения ночного неба [Marovich and Roach, 1963].

Согласно установившимся представлениям формирование SAR-дуг происходит в магнитосфере вблизи плазмопаузы в результате взаимодействия горячих ионов кольцевого тока с холодной плазмой плазмосферы. Возникающие при этом волны разогревают холодные электроны плазмосферы. Их поток вдоль силовых линий в ионосферу и вызывает свечение атмосферы (SAR-дугу) в красной эмиссии на высотах ~400 км. Таким образом, SAR-дуги имеют природу, отличную от природы обычных полярных сияний, располагающихся в более высоких широтах. Полярные сияния в овале и диффузное свечение к экватору от овала обусловлены вторжениями в атмосферу энергичных электронов из плазменного слоя хвоста магнитосферы и из внутренней магнитосферы в результате переноса их направленной к Земле конвекцией. SAR-дуги возникают за счет вторжения в атмосферу холодных электронов плазмосферы, разогреваемых при взаимодействии ионов кольцевого тока с плазмосферной плазмой.

Цель данной работы: показать, что во время магнитных бурь диффузное свечение регистрируется на всех широтах между наиболее низкой широтой визуально наблюдаемого аврорального свечения и овалом полярных сияний, появление SAR-дуг небольшой интенсивности связано с высыпаниями электронов очень низких энергий вблизи внутренней (околоземной) границы магнитосферной конвекции.

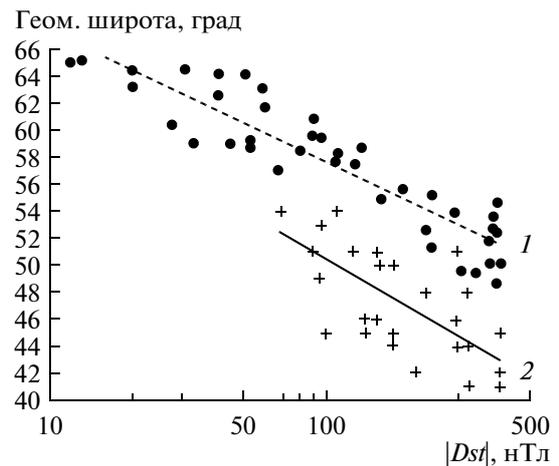


Рис. 1. Точки — положение экваториальной границы овала сияний в зависимости от  $Dst$ -индекса [Старков, 1993]. Крестики — предельные значения широты распространения аврорального свечения в зените по визуальным данным.

## 2. ОВАЛ ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЙ И ДИФFUЗНОЕ СВЕЧЕНИЕ К ЭКВАТОРУ ОТ ОВАЛА

Известно, что минимальная широта экваториальной границы овала полярных сияний, характеризующая наименьшее геоцентрическое расстояние внутренней кромки плазменного слоя в хвосте магнитосферы, приходится на около полуденные часы [Старков, 1993]. Во время магнитных бурь граница смещается к экватору, величина смещения определяется интенсивностью  $Dst$ -вариации. На рисунке 1 точками обозначены систематизированные Старковым [1993] положения экваториальной границы овала сияний в зависимости от  $Dst$ -индекса по данным разных исследователей. Штриховой линией показано полученное методом наименьших квадратов уравнение регрессии исправленной геомагнитной широты  $\Phi'$  от интенсивности  $Dst$ :

$$\Phi' = 77.3^\circ - 9.8 \lg |Dst|, \quad (1)$$

коэффициент корреляции  $r = 0.92$ .

Крестиками на этом рисунке нанесены предельные значения широты распространения аврорального свечения в зените, определенные нами по данным визуальных наблюдений полярных сияний, содержащиеся за период МГГ на визуальных визоплотах [Annals IGY, 1964]. Для анализа использовались все интервалы наблюдений с  $Dst < -100$  нТл. Данные охватывали преимущественно долготные сектора  $D$  (Восточная Сибирь),  $G$  и  $H$  (северо-американский континент). Уравнение регрессии, полученное методом наименьших квадратов, изображено сплошной линией:

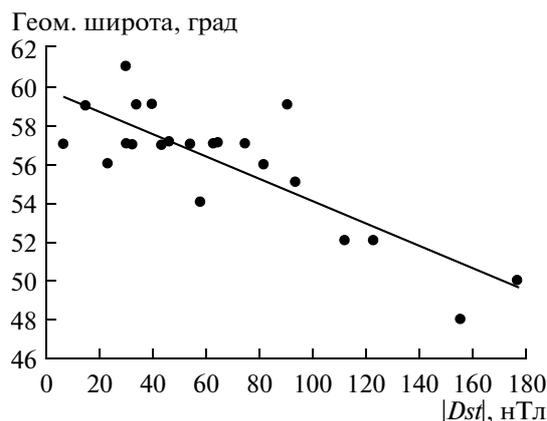


Рис. 2. Точки – положение экваториальной границы свечения по визоплотам в зависимости от  $Dst$ -индекса в периоды появления SAR-дуг по работе [Marovich and Roach, 1963], сплошная линия – линия регрессии.

$$\Phi' = 74.7^\circ - 12.05 \lg |Dst|, \quad (2)$$

коэффициент корреляции  $r = 0.7$ .

Линия регрессии для экваториальной границы визуального свечения сдвинута на  $\sim 7.5^\circ$  к югу от границы области существования обычных полярных сияний. Это означает, что во время магнитных бурь граница области появления на визоплотах аврорального свечения в зените, отражает не экваториальную границу обычных сияний овала, а характеризует располагающееся на более низких широтах диффузное свечение. При изменении  $Dst$  от  $-100$  нТл до  $-400$  нТл граница свечения по визоплотам сдвигается к экватору на  $\sim 7^\circ$ . Действительно, в главную фазу магнитных бурь интенсивность диффузного свечения резко возрастает [Akasofu and Charman, 1962]. В результате оно начинает фиксироваться как камерами всего неба, так и при визуальных наблюдениях.

### 3. ВИЗУАЛЬНОЕ СВЕЧЕНИЕ И SAR-ДУГИ

В работе [Marovich and Roach, 1963] исследованы положения SAR-дуг, наблюдавшихся на станции Rapid City (исправленная геомагнитная широта  $\Phi' = 53.3^\circ$ ) в период МГГ. Фотометр сканировал все небо в эмиссиях 557.7 нм и 630.0 нм. В работе приведены интервалы наблюдений дуг по местному времени ( $UT = MLT + 7$ ). С ноября 1957 г. по декабрь 1958 г. дуги идентифицированы в 23 случаях. В предположении высоты дуг 400 км получено их распределение: экстремально северная дуга –  $58.7^\circ$ , медиана –  $53.3^\circ$ , экстремально южная дуга –  $41.5^\circ$  геомагнитной широты. Существует значительная концентрация дуг на широте  $\Phi' = 53^\circ$  ( $L = 3$ ). Такое расположение SAR-дуг означает, что они наблюдаются, главным образом, на широтах  $\sim 14^\circ$  экваториальнее дискретных форм полярных сияний в ночном секторе овала.

На существование среднеширотного максимума в частоте появления полярных сияний обращали внимание Исаев [1962] и Пудовкин и др. [1971], связывая его с расщеплением высокоширотной полосы полярных сияний. Согласно Хорошевой [1987] такое расщепление происходит во время магнитных бурь, достигая  $12^\circ$  по широте при интенсивных магнитных бурях. Между овалом и SAR-дугами имеется разрыв в интенсивности свечения.

По визуальным наблюдениям в период МГГ [Annals IGY, 1964] на близких к Rapid City долготам в секторах  $G$  и  $H$  нами были определены наиболее низкие широты аврорального свечения в зените для всех периодов наблюдений SAR-дуг, указанных в [Marovich and Roach, 1963, табл. 2]. Получены в геомагнитных координатах уравнения регрессии для предельных широт свечения в зависимости от индексов  $Kp$  и  $|Dst|$ . Соотношения имеют вид:

$$\Phi'(\text{град.}) = 63.5^\circ - 1.65 Kp; \quad (3)$$

$$r = 0.7 \quad \Phi'_{\text{cp}} = 56^\circ; \quad Kp_{\text{cp}} = 4+$$

$$\Phi'(\text{град.}) = 59.8^\circ - 0.057 |Dst|; \quad (4)$$

$$r = 0.82 \quad \Phi'_{\text{cp}} = 56^\circ; \quad |Dst|_{\text{cp}} = 67 \text{ нТл.}$$

Распределение предельных значений экваториальной широты свечения по визоплотам в зависимости от  $|Dst|$  в часы наблюдения SAR-дуг приведено на рис. 2. Медианное значение положения дуг в работе [Marovich and Roach, 1963]  $53.3^\circ$ , что на  $3^\circ$  отличается от среднего положения свечения в зените пункта наблюдения по визоплотам. Отметим, что из 23 событий с SAR-дугами, только 4 события приходятся на магнитные бури с  $100 \text{ нТл} < |Dst| < 180 \text{ нТл}$ . В большинстве случаев SAR-дуги наблюдались при незначительных магнитных возмущениях с  $7 \text{ нТл} < |Dst| < 100 \text{ нТл}$ . SAR-дуги не наблюдались при высоких значениях  $|Dst|$ , хотя в период МГГ отмечались интенсивные магнитные бури. В обзоре [Roach and Roach, 1963] приведена та же таблица из работы [Marovich and Roach, 1963] с наблюдениями SAR-дуг и указанием значений  $Kp$  в периоды наблюдений. Полученное медианное значение  $Kp = 4+$ , хорошо совпадает с нашими данными по визуальным наблюдениям.

Таким образом, между положением SAR-дуг, исследованных в работе [Marovich and Roach, 1963] за период МГГ, и одновременно наблюдаемым визуально авроральным свечением в том же долготном секторе, если и существует разрыв по широте, то его размер  $\sim 3^\circ$ , но никак не  $14^\circ$ .

#### 4. АВРОРАЛЬНОЕ СВЕЧЕНИЕ В СРЕДНИХ ШИРОТАХ И SAR-ДУГИ

Рассмотрение визуально наблюдаемого аврорального свечения и SAR-дуг в предшествующих разделах ограничивалось периодом МГГ. Это обусловлено доступностью материалов визуальных наблюдений, составляющих тома “Анналов МГГ”. Однако наблюдения SAR-дуг в МГГ проводились спорадически, отсутствовали прямые данные о локализации, интенсивности и спектральном составе потоков вторгающихся в верхнюю атмосферу частиц, ответственных за возбуждение свечения. Регулярные наблюдения диффузного аврорального свечения и SAR-дуг проводились на станции Маймага (ИКФИА ЯНЦ СО РАН,  $\Phi' \approx 57^\circ$ ,  $\Lambda' \approx 200^\circ$ , местная геомагнитная полночь в 15.40 UT). Наблюдения велись двухканальным сканирующим фотометром с полем зрения  $3^\circ$  в эмиссиях 557.7 нм и 630.0 нм и камерой полного обзора неба с электронно-оптическим усилителем изображения в эмиссии 630.0 нм. Уверенно идентифицировались неоднородности свечения в эмиссии 630.0 нм с амплитудой более 30–50 R. За два солнечных цикла с 1988 г. по 2006 г. зарегистрированы 225 случаев (ночей) появления SAR-дуг из 620 ночей наблюдений [Алексеев и Иевенко, 2000; 2008]. Следовательно, появление SAR-дуг в средних широтах не экзотическое, а достаточно регулярное явление. Дуги располагались в интервале широт  $49^\circ < \Phi' < 61^\circ$  в зависимости от уровня магнитной активности. Наиболее вероятная широта появления SAR-дуг –  $\Phi' \sim 55.0^\circ\text{--}55.4^\circ$  ( $L \sim 3$ ), их средняя интенсивность  $I \sim 0.15$  kR, при средних значениях индексов магнитной активности  $Dst \sim -40$  нТл,  $AL \sim -230$  нТл,  $Kp \sim 3\text{--}4$  [Иевенко и Алексеев, 2004]. Статистически значимая связь интенсивности свечения SAR-дуг с  $Dst$ , или, с SYM-H индексом, существует только до интервала  $Dst < -50$  нТл. Коэффициенты корреляции свидетельствуют о более тесной связи интенсивности свечения с суббуриями ( $AL$ -индекс), чем с буриями.

На рисунке 3а приведен характерный случай наблюдения с вечерних до утренних часов диффузного свечения и SAR-дуги на станции Маймага 04 декабря 1989 г., детально рассмотренный в работе [Иевенко и Алексеев, 2004]. SAR-дуга, границы которой соответствовали интенсивности свечения ночного неба к экватору и полюсу от максимальной интенсивности в дуге, медленно смещается в экваториальном направлении от вечерних к утренним часам MLT. Ее широтное положение определялось в предположении высоты свечения 450 км. Граница диффузного свечения в зеленой эмиссии к северу от дуги (высота 110 км) отражается изолиниями трех значений поверхностной яркости эмиссии (градиента яркости) и совпадает с изолинией 0.5 kR. Вариация уровня

магнитной активности на рис. 3в свидетельствует, что при относительно спокойном магнитном поле до  $\sim 17.40$  UT SAR-дуга была слабой, ее положение вблизи зенита пункта наблюдения и интенсивность  $\sim 0.18$  kR относительно стабильны (рис. 3б). Начало возмущения сопровождается увеличением скорости смещения дуги к экватору, возрастанием интенсивности в максимуме до  $\sim 0.5$  kR. Между границей диффузного свечения и SAR-дугой зарегистрирован зазор  $\sim 1^\circ\text{--}2^\circ$  по широте в спокойном интервале. При длительной суббуревой активности SAR-дуга отделяется от диффузного аврорального свечения и движется в экваториальном направлении, ширина зазора возрастает до  $\sim 4^\circ$ . Ширина зазора уменьшится, если учесть, что положение границы диффузного свечения связано с методом ее определения. К экватору от изолинии 0.5 kR существует менее интенсивное диффузное свечение, заполняющее пространство на широтах зазора. Таким образом, формирование SAR-дуги происходит в окрестности экваториальной границы диффузного свечения при минимальном широтном зазоре между границами двух явлений.

Положение SAR-дуги 04 декабря 1989 г. пересекал спутник DMSP F9, двигавшийся по практически круговой солнечно-синхронной полярной орбите на высоте 840 км. Комплекс приборов спутника включал измерения потоков электронов и ионов с энергиями от 30 эВ до 30 кэВ. Продолжительность измерения всего спектра 1 с. Наибольший интерес представляют данные каналов низких энергий, характеризующие положение низкоширотной границы области авроральных вторжений.

На рисунке 3а на вертикальных штриховых отрезках, отражающих траекторию DMSP F9, звездочками обозначены экваториальные границы областей вторжения для трех пролетов спутника в ночном секторе по результатам автоматической обработки спутниковых наблюдений, составляющих базу данных APL. Квадратиками обозначены границы области вторжения для тех же пролетов после уточнения базы данных в результате просмотра оригинальных спектрограмм. Различие между базой данных и уточненными данными составляет от  $0.6^\circ$  до  $4^\circ$  для разных пролетов. Пролеты DMSP F9 приходились на  $\sim 23$  MLT в интервале 12–17 UT, когда станция Маймага располагалась в околополуночном секторе. Во всех пролетах уточненная граница области вторжения совпадает в пределах  $1^\circ$  широты с границей диффузного свечения, совпадая или располагаясь на  $1\text{--}2^\circ$  севернее высокоширотной границы SAR-дуги. В  $\sim 21.35$  UT область свечения на меридиане 19.7 MLT пересекал спутник DMSP F8. Граница области вторжения электронов зарегистрирована на  $\Phi' = 56.6^\circ$  (обозначена звездочкой), что на  $\sim 2^\circ$  севернее границы SAR-дуги, которая в эти часы UT на-

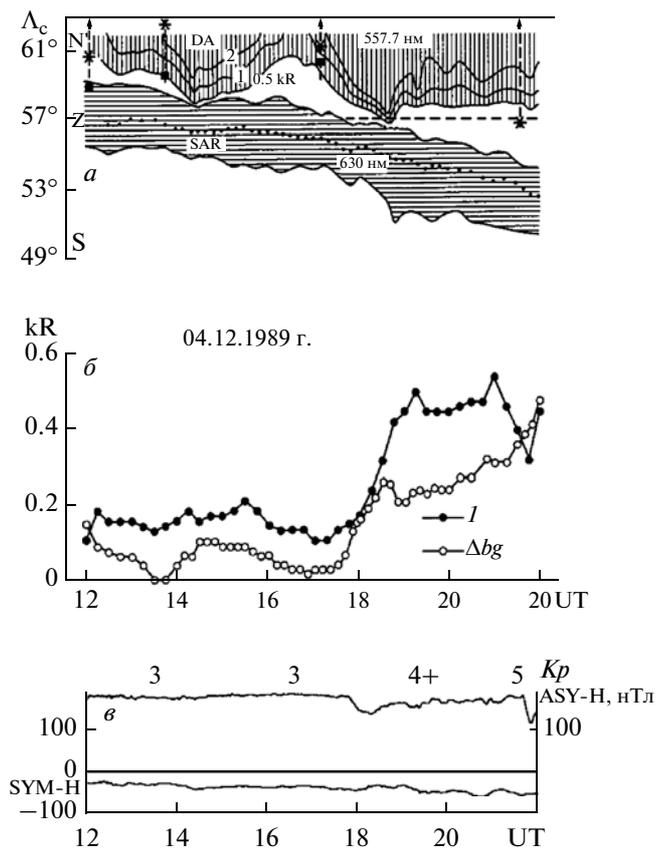


Рис. 3. Модифицированный рисунок из работы [Иевенко и Алексеев, 2004]:

*a* – вариации положения диффузного свечения (DA) в эмиссии 557.7 нм и SAR-дуги [Иевенко и Алексеев, 2004], вертикальные штриховые линии – пролеты спутников DMSP F9 и F8;

*б* – вариации интенсивности SAR-дуги (зачерненные кружки) и фонового свечения (открытые кружки) [Иевенко и Алексеев, 2004];

*в* – магнитная активность (*Kp*, ASY-H, SIM-H).

блюдалась в утренние часы. Так как SAR-дуги обычно дрейфуют к экватору от вечерних к утренним часам, учет этого обстоятельства уменьшит расхождение между границей SAR-дуги и границей области вторжения электронов.

Динамику свечения в SAR-дуге и соотношение его с диффузным свечением иллюстрируют сканнограммы эмиссий 630.0 нм и 557.7 нм для трех моментов времени 24 декабря 1989 г, приведенные на рис. 4 из [Иевенко, 1999]. В красной эмиссии отчетливо проявляется SAR-дуга. Резкий градиент эмиссии в дуге и отчетливая граница диффузного свечения, получаемые при каждом сканировании, позволяют оценить ширину зазора между дугой и диффузным свечением. Необходимо определиться с выбором уровня отсчета интенсивности фонового свечения, на которое накладывается SAR-дуга. Это может быть момент

минимума эмиссии 557.7 нм, усиление эмиссии к северу от которого обусловлено диффузным свечением, а к югу – эффектом Ван Райна. В другом варианте – это минимум фонового свечения в эмиссии 630.0 нм, который существенно меняется со временем. Значение интенсивности свечения в максимуме SAR-дуги и положение ее границы в этом случае зависят от принятого уровня отсчета интенсивности фонового свечения. В первом случае принятый за уровень отсчета минимум одинаков для всех трех временных интервалов и приходится на зенитный угол 15° к югу. Тогда зазор между двумя типами свечения отсутствует в 19.00 UT и в 19.30 UT, но составляет 111 км в 19.50 UT. Во втором варианте зазор отсутствует в 19.00 UT, составляет 167 км в 19.30 UT и 222 км в 19.50 UT. При расчетах для определения расстояния на поверхности Земли от наблюдателя до границы свечения  $L$  использовалось соотношение:

$$L = \pi R / 180 \{ Z - \arcsin[(R \sin Z) / (R + H)] \}, \quad (5)$$

где  $R$  – радиус Земли, равный ~6370 км,  $H$  = 400 км – высота эмиссионного слоя.

Смещение максимума эмиссии характеризует широтное движение дуги. Параллельно с возрастанием интенсивности свечения в SAR-дуге происходит увеличение на ~0.2 kR интенсивности уровня фона, от которого, согласно принятой в [Иевенко, 1999] методике, отсчитывается интенсивность эмиссии в дуге. Это вносит неоднозначность в величины интенсивности SAR-дуг, если их определять с использованием другого фонового уровня.

Авроральную зону 24 декабря 1989 г. в ~20.15 UT пересекал спутник DMSP F8. Экваториальная граница диффузного высыпания была зарегистрирована на  $\Phi' = 56.5^\circ$ , MLT = 4.8, т.е. вблизи зенита пункта наблюдения. Следовательно, граница высыпания авроральных электронов с энергиями более 30 эВ приходится на окрестность границы диффузного свечения в эмиссии 557.7 нм, зафиксированного примерно в это же время наземной аппаратурой.

Рассмотрим изменение интенсивности и спектрального состава вторгающегося потока электронов при движении спутника через экваториальную часть аврорального овала и область диффузного свечения. Детально обсудим пролет DMSP F9 04 декабря 1989 г. в 13.46–13.50 UT. Два других пролета в 12.04–12.08 UT и 17.09–17.12 UT характеризуются аналогичными закономерностями. На рисунке 5*a*–5*г* приведены электронные спектры, характерные для различных авроральных структур. В 13.46:30 UT (рис. 5*a*) спектр квазимонохроматический, с плотностью потока электронов ~10<sup>9</sup>/(см<sup>2</sup> стер сек) на пике энергии в ~1.4 кэВ на  $\Phi' \sim 65.5^\circ$ . Потоки частиц резко

уменьшаются при удалении от пика как в сторону высоких, так и низких энергий. С энергиями более 9.7 кэВ частицы отсутствуют, менее 1.4 кэВ их поток уменьшается почти на два порядка. Такие спектры имеют дискретные формы полярных сияний на широтах овала. В данном пролете эта дискретная форма очерчивает экваториальную границу овала, границу между ним и областью диффузного свечения. К экватору, в области диффузного свечения, спектр смягчается. В 13.46:43 UT (рис. 5б) на  $\Phi' \sim 64.8^\circ$  более чем на порядок увеличивается поток 97 эВ и уменьшается поток 1.4 кэВ электронов. В 13.47:38 UT (рис. 5в) на  $\Phi' \sim 62.0^\circ$  продолжается смягчение спектра: обрезается поток электронов на энергиях  $>1$  кэВ, на порядок уменьшается плотность потока 97 эВ электронов, но сохраняется на достаточно высоком уровне  $\sim 10^7/(\text{см}^2 \text{ стер сек})$  плотность потока электронов минимальных энергий с 31 эВ и 45 эВ. На границе области диффузного вторжения в 13.48:29 UT (рис. 5з) на  $\Phi' \sim 59.4^\circ$  в спектре остаются только электроны минимальных энергий с плотностью потока  $\sim 10^6/(\text{см}^2 \text{ стер сек})$ . Заключаем, что в диффузной области по мере смещения к экватору происходит смягчение спектра электронов и сохраняется достаточно высокий уровень плотности их потока. В этом пролете DMSF F9 граница диффузного вторжения в базе APL приведена на широте  $\Phi' \sim 63.9^\circ$  в 13.47:01 UT, т.е. отличается на  $4.6^\circ$  от широты границы области вторжения на спектрограмме.

### 5. АВРОРАЛЬНОЕ СВЕЧЕНИЕ И ПЛАЗМА В НОЧНОЙ МАГНИТОСФЕРЕ

Основным резервуаром плазмы авроральных энергий в магнитосфере является центральный плазменный слой, располагающийся по обе стороны от нейтрального слоя хвоста магнитосферы, вблизи экваториальной плоскости геомагнитного диполя [Baumjohann et al., 1989; Schödel et al., 2002]. Рассмотрим движение электронов, которые дрейфуют из хвоста магнитосферы по траекториям, вдоль которых для них сохраняются полная энергия  $E$ , первый  $\mu = mv^2/2B$  и второй  $J = \int p_{\parallel} ds$  адиабатические инварианты. В удаленной магнитосфере электроны двигаются преимущественно к Земле под влиянием однородного электрического поля, направленного с утра на вечер, которое возникает внутри магнитосферы при взаимодействии геомагнитного поля с солнечным ветром. По мере конвекции, попадая в область все более интенсивных магнитных полей и менее вытянутых силовых линий, при сохранении адиабатических инвариантов электроны ускоряются, их энергии в плазменном слое возрастают. Этот процесс происходит до определенного геоцентрического расстояния, которое характеризует положение

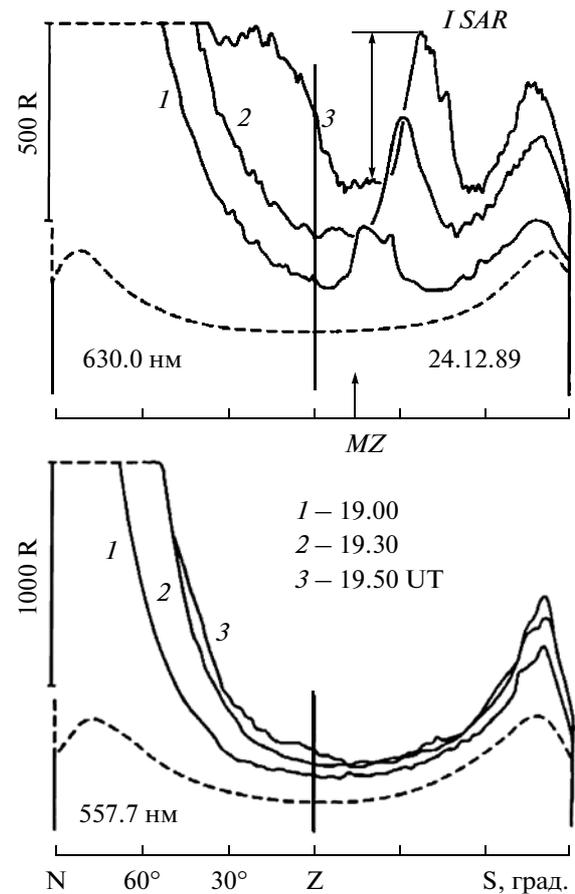


Рис. 4. Сканограммы в эмиссиях 630.0 нм и 557.7 нм 24 декабря 1989 г. в 19.00 UT (1), 19.30 UT (2) и 19.50 UT (3) по работе [Иевенко, 1999].

ние внутренней границы плазменного слоя в ночном секторе [Vasyliunas, 1970; Frank, 1971]. Вблизи внутренней границы располагается и граница захвата энергичных электронов с  $E \sim 25\text{--}40$  кэВ [O'Brien, 1963] и экваториальная граница овала [Feldstein and Starkov, 1970]. Ближе к Земле, во внутренней магнитосфере, электроны низких энергий продолжают дрейф к Земле вдоль изолиний потенциала. Одновременно увеличивается азимутальная компонента дрейфа, обусловленная градиентом магнитного поля и кривизной его силовых линий. Направление азимутального дрейфа для частиц с энергиями в несколько кэВ определяется знаком заряда — электроны двигаются на утреннюю сторону, а ионы — на вечернюю. Азимутальное разделение разноименных зарядов приводит к генерации электрического поля с вечерней стороны на утреннюю, что сопровождается экранировкой исходного электрического поля.

Скорость азимутального дрейфа для электронов зависит от их энергии и более энергичные из них начинают выноситься на утреннюю сторону на больших геоцентрических расстояниях. В ре-

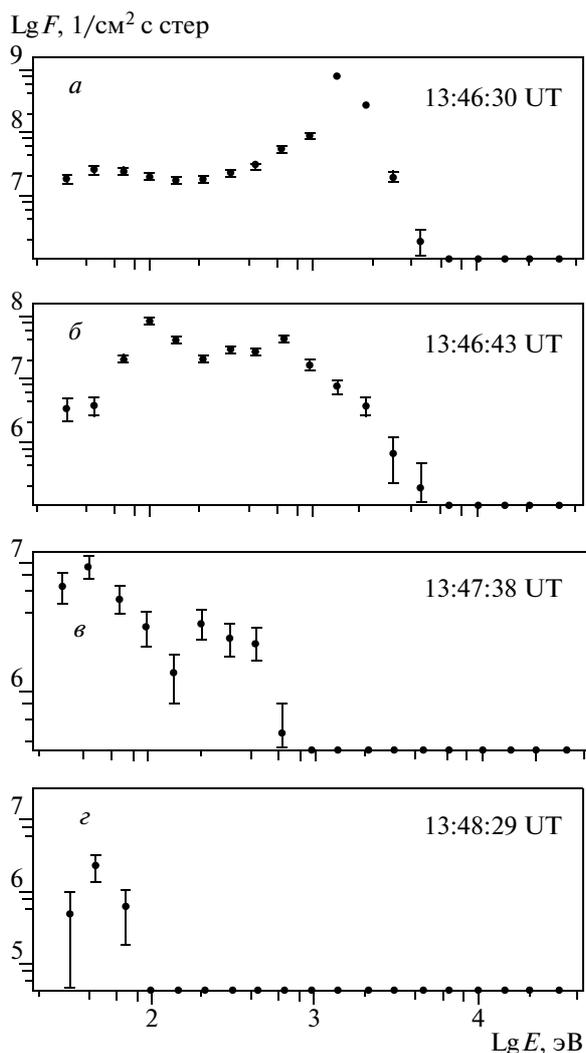


Рис. 5. Спектры электронов, полученные спутником DMSP F9 04 декабря 1989 г. в 13:46:30 UT (а), 13:46:43 UT (б), 13:47:38 UT (в) и 13:48:29 UT (г).

зультате по мере приближения к Земле в потоке возрастает доля частиц с более низкими энергиями. Доля энергичных частиц становится все меньше. Такой процесс продолжается вплоть до геоцентрического расстояния, на котором энергия поступающих из плазменного слоя электронов становится близкой к тепловой. На этом расстоянии движение плазмы из плазменного слоя в направлении Земли прекращается. Граница, на которой прекращается дрейф плазмы из плазменного слоя к Земле, получила название плазмопаузы [Nishida, 1966]. Она ограничивает плазмосферу — домен холодной плазмы. Характерные особенности плазмопаузы — геоцентрическое расстояние  $\sim 4R_E$ , его изменение в течение суток и приближение к Земле в интервалы магнитных возмущений, нашли объяснение в модели [Nishida, 1966]. В плазмосфере плазма пополняется за счет переноса

са холодной плазмы из ионосферы и участвует в коротационном движении вместе с Землей. На плазмопаузе наблюдениями было обнаружено существование скачка плотности плазмы [Carpenter, 1963; Грингауз, 1960]. Такой скачок было естественно ожидать в случае различной природы и характера конвекции плазмы вблизи Земли и на больших расстояниях. При наблюдениях с поверхности Земли граница плазмосферы идентифицировалась как провал в плотности плазмы на высотах области  $F$  ионосферы (ионосферный провал) [Nishida, 1967].

Низко энергичная авроральная плазма на геоцентрических расстояниях между границей плазменного слоя и плазмопаузой вторгается вдоль магнитных силовых линий на высоты ионосферы. Наиболее эффективны в возбуждении диффузного аврорального свечения вторжения электронов с энергиями 10–1000 эВ и <10 эВ. Такие электроны теряют свою энергию на высотах 200–500 км, возбуждая метастабильные эмиссии  $O(^1D)$  и  $O(^1S)$  атомарного кислорода, соответственно красного и зеленого цвета. На таких больших высотах низка дезактивация возбужденных метастабильных состояний. Потенциалы возбуждения эмиссии  $O(^1D)$  низкие ( $\sim 5$  эВ), а поперечные сечения для процессов возбуждения вблизи порогов возбуждения велики. Все это благоприятствует излучению красной линии атомарного кислорода при вторжениях электронов низких энергий.

Возбуждение свечения является следствием не только прямого взаимодействия атомов кислорода с потоком электронов из магнитосферы. Электроны с энергией <10 эВ передают часть своей энергии электронам ионосферы, которые так же становятся источником возбуждения красной эмиссии.

Характерные особенности в параметрах корпускулярных потоков во внутренней магнитосфере и над среднеширотной ионосферой в значительной степени подобны — смягчение спектра, уменьшение плотности энергии вторгающегося потока и ослабление интенсивности свечения в более низких широтах. При этом энергетические спектры потоков электронов на широтах диффузного свечения и во внутренней магнитосфере идентичны по своему характеру [Meng, 1978]. Поэтому представляется естественным связать появление SAR-дуг на экваториальном крае области диффузных высыпаний с потоками электронов малых энергий, имея в виду высокую эффективность процессов возбуждения красной эмиссии электронами с энергиями <10 эВ. Тем более, что отнесение свечения к SAR-дугам в определенной степени произвольно, ибо не существует общепринятых ограничений на величину отношения  $I_{630.0}/I_{557.7}$  эмиссий, широтных перемещений, яркости эмиссии 630.0 нм и продолжительности яв-

ления. Классификация должна основываться в большей степени на физике происхождения источников аврорального свечения, чем на морфологических или спектральных особенностях свечения.

Предельная энергия электронов, измеряемая аппаратурой на спутниках DMSP, составляет 31 эВ. В связи с отсутствием измерений потоков электронов с энергиями  $\sim 10$  эВ оценим по работе [Rassoul et al., 1993] плотность потока электронов, создающего эмиссию 630.0 нм с интенсивностью  $\sim 0.2$  kR. При прямом возбуждении такую эмиссию создает поток электронов  $\sim 0.1$  эрг/см<sup>2</sup> сек или  $6 \cdot 10^9$  электронов/см<sup>2</sup> сек с энергией 10 эВ. Из-за возбуждения разогретыми электронами ионосферы интенсивность эмиссии  $< 0.01$  kR. Таким образом, интенсивность  $\sim 0.2$  kR создается потоком частиц  $6 \cdot 10^9$ /см<sup>2</sup> сек, что находится на уровне потока частиц в диффузном свечении средней интенсивности.

Интенсивности потоков низкоэнергичных электронов, вторгающихся на высоты 295–950 км над SAR-дугами, приведены в [Slater et al., 1987] по измерениям на спутнике Dynamics Explorer 2. Результаты координированных измерений наземными фотометрами эмиссии 630.0 нм и потоков электронов низких энергий спектрометрами на спутнике продемонстрировали наличие тесной связи обоих явлений. Показано, что электроны с  $E < 10$  эВ являются основным источником энергии, поступление которой необходимо для наблюдаемых величин разогрева атмосферы и интенсивности эмиссии в SAR-дугах. По измерениям на спутнике плотности потоков электронов с энергиями 5.1 эВ и 8.8 эВ составляют  $\sim 2 \times 10^8$ – $10^9$  частиц/(см<sup>2</sup> сек эВ), превышая на 3 порядка потоки 20–30 эВ электронов. Интенсивность создаваемой такими потоками красной эмиссии  $\sim 2$  kR.

## 6. ВЫВОДЫ

1. Во время магнитных возмущений к экватору от дискретных форм усиливается интенсивность диффузного свечения. Предельная широта такого свечения в зените по визуальным наблюдениям (визоплотам) характеризует экваториальную границу области аврорального свечения.

2. По данным визоплотов свечение регистрируется на всех широтах между предельной широтой наблюдения аврорального свечения и овалом. Интервал широт между ними заполнен диффузным свечением, обусловленным вторжением в верхнюю атмосферу авроральных частиц.

3. Область диффузного свечения пространственно совпадает с областью мягких электронных вторжений, простирающихся к экватору от границы овала до широты проекции плазмопаузы

на высоты ионосферы. Плотность потока энергии электронов и их энергия уменьшаются с понижением широты, что приводит как к уменьшению интенсивности диффузного свечения, так и к увеличению его высоты в более низких широтах.

4. Существование SAR-дуг небольшой,  $< 1.0$  kR, интенсивности может быть связано с высыпанием низкоэнергичных электронов плазменного слоя. Дуги располагаются вблизи экваториальной границы области диффузных электронных вторжений, где их энергии уменьшаются до  $< 10$  эВ. Такое расположение слабых SAR-дуг обусловлено как характером изменения энергии авроральных частиц при крупномасштабной конвекции плазмы в ночной магнитосфере, так и характером процессов возбуждения и дезактивации эмиссии 630.0 нм в верхней атмосфере.

Исследования выполнены при финансовой поддержке гранта РФФИ № 09-05-00818 и Программы Президиума РАН № 4. Данные спутников DMSP F8 и F9 получены через ИНТЕРНЕТ (<http://sd-www.jhuapl.edu/>).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев В.Н., Величко В.А., Надубович Ю.А. Исследование высот свечения и положения южной границы фонового свечения 6300 А // Физика верхней атмосферы высоких широт. Якутск. Изд. ЯФ СО АН СССР. Вып. 3. С. 124–133. 1975.
- Алексеев В.Н., Иевенко И.Б. Широтная динамика SAR-дуг и ее связь с геомагнитной активностью // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 37. № 5. С. 938–940. 1991.
- Алексеев В.Н., Иевенко И.Б. Частота появления SAR-дуг в течение 22-го цикла солнечной активности // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 40. № 4. С. 113–115. 2000.
- Алексеев В.Н., Иевенко И.Б. Частота наблюдений SAR-дуг в течение 23-го цикла солнечной активности // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 48. № 4. С. 465–468. 2008.
- Воробьев В.Г., Ягодкина О.И. Влияние магнитной активности на глобальное распределение зон авроральных вторжений // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 45. № 4. С. 467–473. 2005.
- Грингауз К.И., Безруких В.В., Озеров В.Д., Ребчинский Р.Е. Исследование межпланетного ионизованного газа, энергичных электронов и солнечной корпускулярной радиации трехэлектродной лопушкой заряженных частиц на второй советской космической ракете // ДАН СССР. Т.151. С.1301–1304. 1960.
- Иевенко И.Б. Динамика диффузного аврорального свечения и SAR-дуги в период суббури // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 33. № 5. С. 42–57. 1993.
- Иевенко И.Б. Воздействие магнитосферной активности на плазмосферу по наблюдениям диффузного свечения и SAR-дуги // Геомагнетизм и аэрномия. 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.
- *Исаев С.И.* Географическое распределение полярных сияний и радиационные пояса Земли // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 2. № 4. С. 663–668. 1962.
- *Красовский В.И.* Полярные сияния // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 7. № 6. С. 945–957. 1967.
- *Пудовкин М.И., Исаев С.И., Зайцева С.А.* Влияние DR-токов на структуру зоны полярных сияний // Морфология и физика полярной ионосферы. Л. Наука. С. 33–46. 1971.
- *Нишида А.* Геомагнитный диагноз магнитосферы. М.: Мир. 299 с. 1980.
- *Старков Г.В.* Планетарная морфология сияний // Магнитосферно-ионосферная физика. Краткий справочник. Ред. Ю.П. Мальцев. С-Пб. Наука. 184 с. 1993.
- *Фельдштейн Я.И.* Географическое распределение полярных сияний и азимуты дуг // Исследования полярных сияний. М.: Изд. АН СССР. № 4. С. 61–78. 1960.
- *Фельдштейн Я.И.* Некоторые вопросы морфологии полярных сияний и магнитных возмущений в высоких широтах // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 3. № 2. С. 227–239. 1963.
- *Хорошева О.В.* Пространственно-временное распределение полярных сияний и их связь с высокоширотными геомагнитными возмущениями // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 1. № 5. С. 695–701. 1961.
- *Хорошева О.В.* Суточный дрейф замкнутого кольца полярных сияний // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 2. № 5. С. 839–850. 1962.
- *Хорошева О.В.* Протяженность дуг полярных сияний и их пространственная ориентация // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 3. № 2. С. 363–366. 1963.
- *Хорошева О.В.* Магнитосферные возмущения и динамика ионосферных электроструй, полярных сияний и плазмопаузы // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 27. № 5. С. 804–811. 1987.
- *Akasofu S.-I., Chapman S.* A large change in the distribution of the auroras during the 11 February 1958 magnetic storm // J. Atmos. Terr. Phys. V. 24. № 8. P. 740–742. 1962.
- *Annals of the International Geophysical Year.* Vol. XXIX. I.G.Y. Auroral visoplots. Ed. B. McInnes. Pergamon Press Ltd. 507 p. 1964.
- *Barbier D.* L'arc auroral stable // Ann. Geophys. V. 16. № 4. P. 544–549. 1960.
- *Baumjohann W., Paschmann G., Cattell C.A.* Average plasma properties in the central plasma sheet // J. Geophys. Res. V. 94. № 6. P. 6597–6606. 1989.
- *Carpenter D.L.* Whistler evidence of a “knee” in the magnetospheric ionisation density profile // J. Geophys. Res. V. 68. № 6. P. 1675–1682. 1963.
- *Chapman S.* Aurora in middle and low latitudes // Ann. IGY. V. 4. № 2. P. 25–40. 1957.
- *Feldstein Ya.I., Starkov G.V.* The auroral oval and the boundary of closed field lines of geomagnetic field // Planet. Space Sci. V. 18. № 4. P. 501–508. 1970.
- *Feldstein Y.I., Galperin Y.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.
- *Frank L.A.* Relationship of the plasma sheet, ring current, trapping boundary, and plasmapause near the magnetic equator and local midnight // J. Geophys. Res. V. 76. № 10. P. 2265–2275. 1971.
- *Lui A.T.Y., Perreault P., Akasofu S.-I., Anger C.D.* // The diffuse aurora. Planet. Space Sci. V. 21. № 5. P. 857–861. 1973.
- *Lui A.T.Y., Meng C.-I., Ismail S.* Large amplitude undulations on the equatorward boundary of the diffuse aurora // J. Geophys. Res. V. 87. № 4. P. 2385–2400. 1982.
- *Marovich E., Roach F.E.* Distribution of latitude of red arcs // J. Geophys. Res. V. 68. № 7. P. 1885–1888. 1963.
- *Meng C.-I.* Electron precipitation and polar auroras // Space Sci. Review. V. 22. № 8. P. 223–300. 1978.
- *Nishida A.* Formation of plasmapause, or magnetospheric plasma knee, by the combined action of magnetospheric convection and plasma escape from the tail // J. Geophys. Res. V. 71. № 23. P. 5669–5679. 1966.
- *Nishida A.* Average structure and storm-time change of the polar topside ionosphere at sunspot minimum // J. Geophys. Res. V. 72. № 23. P. 6051–6061. 1967.
- *O'Brien B.J.* A large diurnal variation of the geomagnetically trapped radiation // J. Geophys. Res. V. 68. № 4. P. 989–995. 1963.
- *Rassoul H.K., Rohrbaugh R.P., Tinsley B.A., Slater D.W.* Spectrometric and photometric observations of low-latitude aurorae // J. Geophys. Res. V. 98. № 5. P. 7695–7709. 1993.
- *Rees M.H., Roble R.G.* Observations and theory of the formation of stable auroral red arcs // Res. Geophys. V. 13. № 1. P. 201–242. 1975.
- *Roach F.E., Barbier D., Duncan R.A.* Observation of a 6300 Å arc in France, the United States and Australia // Ann. Geophys. V. 18. № 4. P. 390–391. 1962.
- *Roach F.E., Roach J.R.* Stable 6300 Å auroral arcs in mid latitudes // Planet. Space Sci. V. 11. № 5. P. 523–545. 1963.
- *Schödel R., Dierschke K., Baumjohann W., Nakamura R., Mukai T.* The storm time central plasma sheet // Ann. Geophys. V. 20. № 11. P. 1737–1741. 2002.
- *Slater D.W., Gurgiolo C., Kozyra J.U., Kleckner E.W., Winningham J.D.* A possible energy source to power stable auroral red arcs: precipitating electrons // J. Geophys. Res. V. 92. № 5. P. 4543–4552. 1987.
- *Vasyliunas V.M.* Magnetospheric plasma // Solar-Terrestrial Physics. 1970. Edited by E.R. Dyer. V. 3. P. 192–211. 1972.