

УДК 550.383:551.521

ВЗАИМОСВЯЗЬ ПОТОКОВ АВРОРАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ И ПРОДОЛЬНЫХ ТОКОВ С ОПТИЧЕСКИМИ ЭМИССИЯМИ ВЫСОКОШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ НА ИСЗ «ИНТЕРКОСМОС — БОЛГАРИЯ-1300»

*Кузьмин А. К., Лазарев В. И., Тельцов М. В.,
Школьникова С. И.*

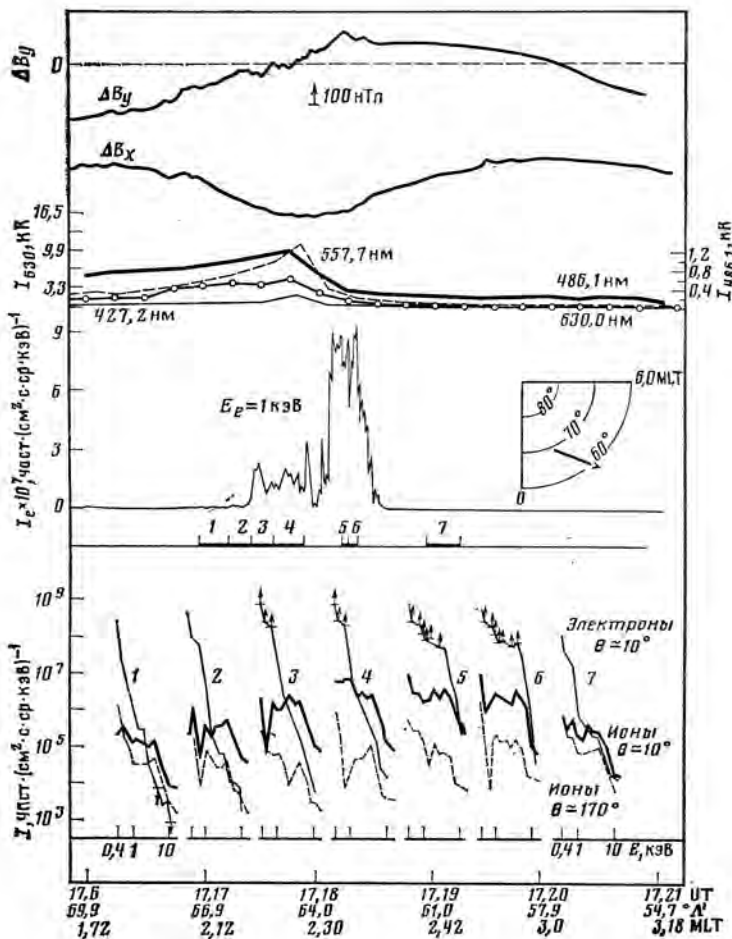
Проанализированы характеристики свечения верхней атмосферы, потоков высыпавшихся частиц и продольных токов в утреннем и вечернем секторах. Пространственное распределение различных форм оптических эмиссий в верхней атмосфере, прямо связанное с интенсивностью и спектром вторгающихся электронов, согласуется с концепцией, по которой вторжения жестких электронов и связанные с ними дискретные формы свечения более характерны для области вытекающего продольного тока, область же мягких вторжений и диффузные формы свечения присущи втекающему току. При непосредственных наблюдениях качественно подтвердилась полученная из модельных расчетов связь характеристик излучения верхней атмосферы в основных линиях и характеристик вторгающихся электронов.

1. К настоящему времени осуществлен ряд экспериментов на ракетах и ИСЗ по комплексному изучению характеристик плазмы в авроральной ионосфере и магнитосфере. В опубликованных работах, посвященных главным образом выяснению взаимосвязей крупномасштабных магнитосферных процессов, анализируются различные сочетания спутниковых, ракетных и наземных измерений: продольные токи и потоки частиц [1, 2], продольные токи и интенсивности свечения [3, 6], потоки частиц и интенсивности свечения [7, 8].

Большую роль в анализе результатов, получаемых с ракет и спутников, играют фотометрические данные. Эти данные позволяют сделать прямую привязку измерений характеристик плазмы на спутнике к «мгновенному» положению и размерам аврорального овала в данный конкретный момент времени. Такая привязка дает возможность соотнести исследуемый на спутнике процесс с соответствующим отображением этого процесса в ионосфере. Кроме пространственной привязки, параметр фотометрических измерений — интенсивность свечения (поверхностная яркость) основных атмосферных эмиссий дает возможность соотнести и энергетические характеристики проведенных комплексных исследований. Хотя только 4% общей энергии, вносимой в атмосферу высыпавшимися частицами, доступно для наблюдений в видимом диапазоне, измеренные абсолютные величины интенсивности эмиссионных линий 427,8 нм (N_2^+), 557,7 нм [OI], 630,0 нм [OI] и их отношения обеспечивают надежную информацию о потоке энергии, поглощенной в атмосфере, и средней характеристической энергии высыпавшихся авроральных частиц [9].

В настоящей работе изучается взаимосвязь потоков высыпавшихся частиц и продольных токов и характеристик свечения верхней атмосферы, одновременно измеренных в утреннем и вечернем секторах MLT на ИСЗ «Интеркосмос—Болгария-1300». Спутник был запущен 7. VIII 1981 г. на орбиту, близкую к круговой, высота орбиты ~850 км, наклонение ~82°. Спутник стабилизирован по трем осям с точностью $\pm 1^\circ$.

2. Магнитные измерения проводились трехкомпонентным феррозон-

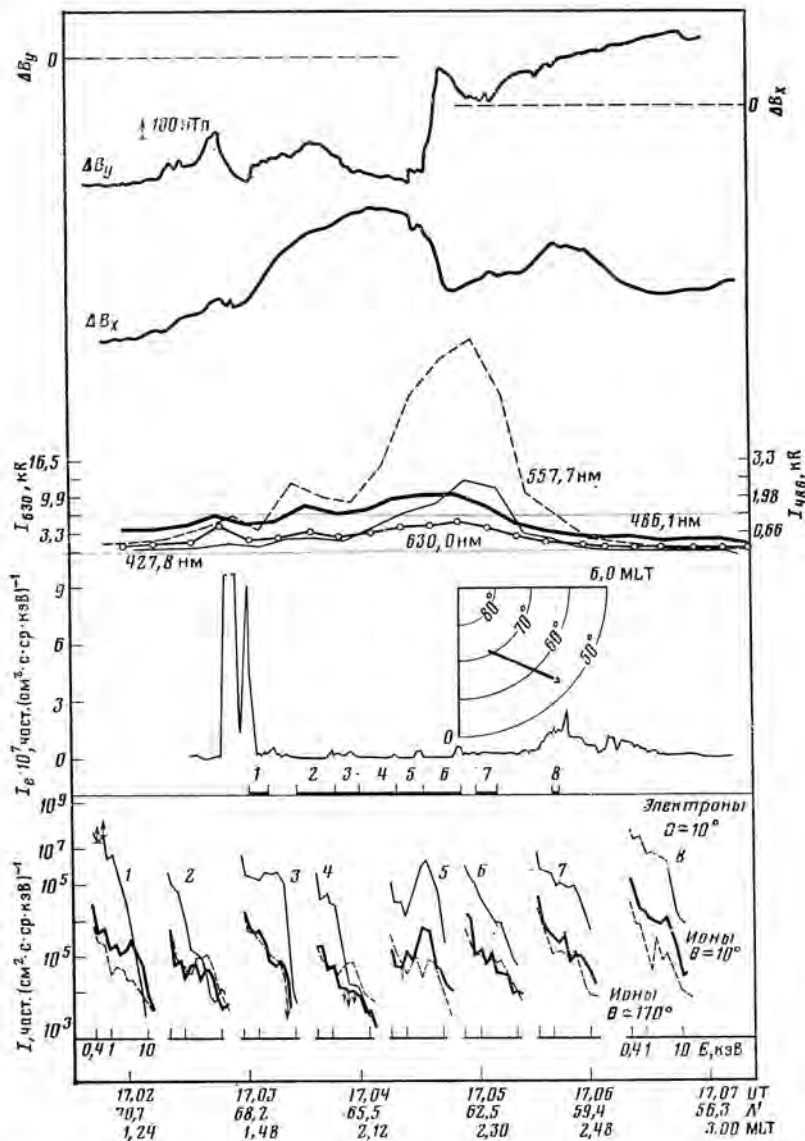


Фиг. 1. Магнитные возмущения ΔB_x , ΔB_y , интенсивность оптических атмосферных эмиссий с $\lambda=427,2, 486,1, 557,7, 630$ нм, относительная интенсивность потока высшающих в ионосферу электронов с $E=1$ кэВ и дифференциальные спектры электронов и ионов, измеренные в утреннем секторе MLT перед началом суббури. Указаны мировое время UT, инвариантная широта λ' и местное магнитное время MLT. Справа приведена проекция орбиты спутника в системе координат λ', MLT

довым магнитометром с чувствительностью 2 нТл, ориентированным так, что ось x совпадала с вектором скорости спутника, ось z была направлена на Землю, а ось y дополняла систему координат до правой. Аппаратура и методика обработки данных подробно описаны в [10].

Исследования низкоэнергичных электронов проводились с помощью энергоспектрометра [11] в трех направлениях: по вектору скорости, нормально к вектору скорости от Земли и к Земле. В двух последних случаях ось симметрии апертурного угла была в полярной области направлена соответственно под углами $\theta \sim 10^\circ$ и $\sim 170^\circ$ к силовой линии. В дальнейшем мы считаем эти величиныpitch-углами исследуемых частиц, хотя на самом деле измерительный тракт принимает потоки в пределах нескольких градусов от оси апертур. Из каждого направления проводились измерения электронов и ионов в общем энергетическом диапазоне 0,4–15 кэВ в 16 энергетических интервалах. Кроме того, спектрометр имел три отдельных канала измерения электронов с фиксированной энергией 1 кэВ по каждому из трех направлений для подробного исследования пространственно-временных вариаций потоков авроральных частиц.

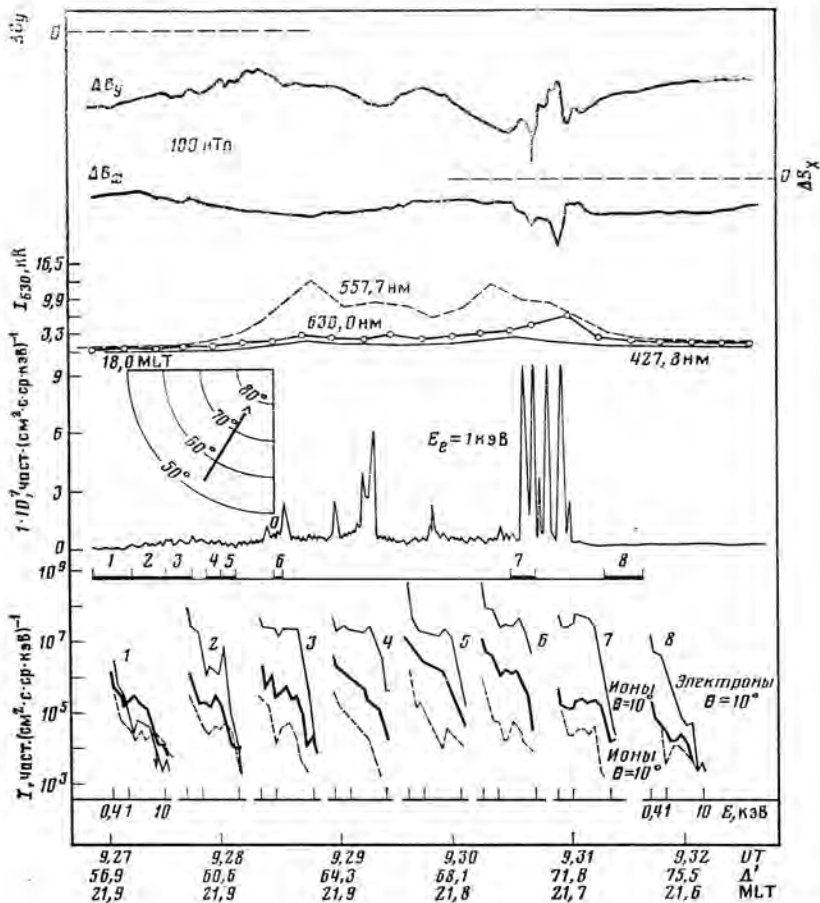
Интенсивность атмосферных эмиссий регистрировалась двухканальным фотометром [12]. Первый канал, работающий в режиме счета квантов, имел коническое поле зрения $1,6^\circ$, что на высоте эмиссионного слоя



Фиг. 2. Результаты комплексных измерений магнитного поля, интенсивности оптических атмосферных эмиссий и потоков заряженных частиц в утреннем секторе MLT во время фазы развития суббури. Обозначения см. фиг. 1

(~ 100 км) соответствует площадке наблюдения диаметром 20 км. В этом канале измерялись интенсивности эмиссий: 427,8 нм (N_2^+), 486,1 нм ($H\beta$), 557,7 нм (OI), 630,0 нм (OI), 634,5 нм (OI), 732,0 нм (OII). Светофильтры расположены на диске, имеющем 8 дискретных позиций с полным периодом вращения 16 с, время измерения в одном положении $\sim 1,5$ с. Абсолютная чувствительность этого канала $3,7 \text{ имп} \cdot (\text{с} \cdot \text{рэлей})^{-1}$ (для 630,0 нм). Второй канал, работавший в режиме измерения среднего тока, регистрировал распределение эмиссии 630,0 нм. В поле зрения этого канала было установлено сканирующее зеркало, с помощью которого «мгновенным» полем зрения (3°) в подспутниковой области за 1 с просматривалась полоса размером 28×285 км поперек трассы спутника. Перекрывание каждой последующей полосы с предыдущей составляло 0,75 ее ширины, т. е. ~ 22 км.

В настоящей работе рассматриваются некоторые типичные результаты, полученные при пролетах ИСЗ в утреннем и вечернем секторах



Фиг. 3. Результаты комплексных измерений в вечернем секторе MLT во время суббури. Обозначения см. фиг. 1

MLT при различной магнитной активности. На фиг. 1–3 в одном временном масштабе приведены распределения разностей компонент магнитного поля ΔB_x и ΔB_y , интенсивности эмиссий 427,8; 630,0; 557,7 и 486,1 нм, потока электронов с фиксированной энергией 1 кэВ, имеющихpitch-угол $\theta \sim 10^\circ$. На шкале интенсивностей основных эмиссионных линий представлены значения для канала 630,0 нм, практически эти же значения сохраняются и для канала 427,8 нм. Значения интенсивностей эмиссионной линии 557,7 нм, полученные с графика, должны быть уменьшены в три раза. Там же приведены спектральные распределения потоков электронов и ионов, движущихся к Земле ($\theta \sim 10^\circ$), и потоков ионов от Земли ($\theta \sim 170^\circ$), причем отрезками указаны моменты и длительность интервалов времени, в течение которых измерялись спектры с соответствующим номером. Отметим, что между измерением потока высыпающихся частиц и связанных с ним атмосферных эмиссий имеется временной сдвиг из-за того, что фотометрические наблюдения проводятся в направлении в нади́р, а силовая линия, на которой находится спутник и на которой в этот момент проводятся измерения, наклонена к Земле. В силу этого фотометрическая регистрация явления по времени или опережает, или отстает на 15–25 с от соответствующих измерений потоков частиц и магнитного поля, в зависимости от того, двигается спутник от высоких широт в низкие или поднимается из низких широт в более высокие (в нашем случае — соответственно в утреннем и вечернем секторах).

3. Данные, представленные на фиг. 1 и 2, получены в утреннем секторе MLT соответственно 21.I в 17.16–17.21 и 22.I 1982 г. в 17.02–17.07 UT. Соответствующие части проекции орбит в координатах MLT — λ'

и направление спутника показаны на каждой фигуре. В оба указанных интервала времени спутник прошел над северной частью Восточной Сибири. По наземным магнитным данным ст. Тикси 21.1 1982 г. спутник пересек авроральный овал непосредственно перед суббури с максимальным понижением горизонтальной компоненты магнитного поля до 900 вТл. Распределение измеренных компонент магнитного поля на спутнике (фиг. 1) показывает, что изменение поля довольно монотонно, с некоторой слабо выраженной структурой, детали которой имеют длительность от одной до нескольких секунд, т. е. с масштабами продольных токов от нескольких километров до нескольких десятков километров. Вся эта область заполнена высыпаящимися электронами, имеющими чрезвычайно мягкий, круто падающий спектр (спектры № 1—4 на фиг. 1), и довольно жесткими потоками высыпаящихся ионов.

Широтный разрез интенсивности измеряемых оптических атмосферных эмиссий в этой области показывает, что спутник пересек однородную область свечения с возрастанием интенсивности зеленой линии атомного кислорода 557,7 нм к ее приэкваториальному краю; область не имеет выраженных структурных образований. Довольно большие величины отношения интенсивностей $I(630,0)/I(427,8)$ ($\sim 4 \div 6$) подтверждают, что преобладают вторгающиеся электроны с сильно смягченным спектром. На экваториальном краю области свечения (временной интервал 17.18:15—17.18:25 UT) наблюдается значительный поток электронов с $E_e=1$ кэВ (спектры 5, 6), соответствующий (с учетом отставания измерений электронов) максимальной интенсивности свечения во всех линиях и минимуму отношения $I(630,0)/I(427,8) \sim 2,2$, что связано с вторжением электронов с более жестким спектром.

Следует подчеркнуть некоторые специфические особенности полученных на этом витке результатов. Как уже указывалось, спутник пересекал авроральную область перед самым началом магнитного возмущения; тем не менее заметно развитие некоторых признаков, характерных для возмущенных условий [13]: намечается расслоение втекающего продольного тока (разности ΔB_x и ΔB_y построены в орбитальной системе координат, в которой положительные градиенты ΔB_y соответствуют втекающему току, а отрицательные — вытекающему), появление узких областей вытекающего тока, увеличение средней энергии электронов, заметное появление значительных потоков электронов с $E_e=1$ кэВ и увеличение интенсивности свечения в линии 557,8 нм на экваториальном краю авроральной области.

На фиг. 2 представлены данные, полученные ровно через сутки в утреннем секторе MLT 22.1 1982 г. в 17.02—17.07 UT. На этот раз измерения проводились на фазе развития суббури. На фотометрическом разрезе можно наблюдать три отдельные дуги, область существования которых (с учетом эффекта опережения) совпадает по времени с областями отрицательных градиентов ΔB_y , т. е. со значительными вытекающими токами.

4. Сравним характеристики электронных потоков (поток энергии, характеристическая энергия и т. д.), соответствующих конкретному соотношению основных эмиссионных линий, полученных из модельных расчетов [9] и измеренных непосредственно. Однако при таком сравнении не во всех случаях могут быть получены сопоставимые результаты, во-первых, из-за немаксвелловского распределения электронов, во-вторых, из-за ограниченности энергетического диапазона работы прибора. Вероятно, можно ожидать близких результатов при жестком спектре вторгающихся электронов, когда доступна измерению большая часть потока, или при явлениях типа обратного V. В первой со стороны полюса самой слабой по интенсивности дуге отношение интенсивностей в линиях 630,0 и 427,8 нм составляет 1,5—2, а оценка характеристической энергии [9] дает величину $E_0 \sim 0,8$ кэВ. В области второй (17.03:00—17.03:40 UT) и особенно третьей дуги (17.04:00—17.05:10 UT) это отношение падает до ~ 1 и $\sim 0,3$, а абсолютная интенсивность в линии 427,8 нм растет до 13 kR (в области третьей дуги). Уменьшение отношения связано с уве-

личением жесткости спектров (спектры № 3, 5, 7, 8), причем спектр № 5 имеет характерную форму обратного V с максимумом около 4 кэВ. Оценка по модели [9] дает для спектра № 5 величину $E_0 \sim 1,2$ кэВ, что значительно отличается от средней энергии электронов (4,5 кэВ), и направленный поток энергии электронов, равный $13,6 \text{ эрг} \cdot (\text{см}^2 \cdot \text{с})^{-1}$. Измеренный поток энергии электронов составил $16,4 \text{ эрг} \cdot (\text{см}^2 \cdot \text{с})^{-1}$ в предположении изотропии частиц. На спектре № 7 (соответствующем третьей дуге) наблюдается широкое плато в области нескольких кэВ. Следует отметить, что в области высокой интенсивности свечения в линии 557,7 нм форма спектров высыпавшихся электронов меняется. Жесткие высыпания с потоками выше $10^7 \text{ частиц} \cdot (\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср} \cdot \text{кэВ})^{-1}$ при энергиях частиц в несколько кэВ чередуются с более мягкими высыпаниями (спектры № 4 и № 6). Фотометр измеряет интенсивность одной линии в течение 1,5 с со скважностью 16 с, т. е. не разрешает структурные образования в областях свечения в одной линии с масштабами менее ~ 150 км, поэтому наблюдавшиеся вариации формы спектров говорят, по-видимому, о том, что крупномасштабные дуги, регистрируемые фотометром, имеют тонкую структуру, соответствующую мелкомасштабным жестким высыпаниям, хорошо коррелирующим с мелкомасштабными вытекающими продольными токами. Распределения ионов в этой области также весьма изменчивы. Если в спектре № 3 потоки ионов практически изотропны, то в интервале времени, соответствующем измерению спектра № 4, преобладал восходящий поток ионов с энергией в несколько кэВ при незначительном высыпании электронов и ионов. В следующем интервале (спектр № 5) поток высыпавшихся ионов увеличился почти на два порядка (до $7 \cdot 10^5 \text{ ион} \cdot (\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср} \cdot \text{кэВ})^{-1}$).

На фиг. 3 представлены данные, полученные при пересечении спутником вечернего сектора MLT 18.XII 1981 г. (орбита 1878). По данным ст. Уэлен, в районе которой спутник пересек авроральный овал в 8.00–10.00 UT, наблюдалось развитие суббури с максимальным понижением H -компоненты магнитного поля до 250 нТл. Данные бортового магнитометра (фиг. 3, ΔB_y) показывают, что спутник пересек крупномасштабную токовую систему, которая изрезана мелкомасштабными возмущениями, характерными для расслоенного продольного тока во время магнитных возмущений [13] и соответствующими значительным вариациям потоков электронов в области интенсивных высыпаний. На фотометрическом разрезе видна обширная область свечения в линии 557,7 нм, включающая два протяженных максимума на краях области. Третий, гораздо менее интенсивный максимум на фиг. 3 выражен слабее в основном из-за размывания всей фотометрической картины значительным отражением подстилающей поверхности, коррекции на которую не проводилось. В интервале инвариантных широт $57\text{--}61^\circ$ отношение интенсивностей 630,0 и 427,8 нм составляло $3 \div 4$ и связанные с этим свечением потоки электронов имели крутой падающий спектр и низкую интенсивность (спектр № 1). Развитие интенсивного свечения в линии 557,7 нм сопровождалось уменьшением отношения свечения в линиях 630,0 и 427,8 нм до $\sim 1,2$ и появлением жестких спектров (спектры № 2–6). Так, в спектре № 3 средняя энергия увеличилась до 2,7 кэВ (характеристическая энергия $E_0 \sim 1$ кэВ). Как уже указывалось выше, в потоках с большой средней энергией основная часть потока энергии электронов переносится частицами, лежащими в рабочем диапазоне прибора, т. е. в области энергий 0,4–15 кэВ. Поэтому следует ожидать приближения реально измеренных величин к оценкам по модели. Так, согласно [9] для возбуждения свечения в линии 427,8 нм интенсивностью $1,98 \text{ кR}$ (спектр № 6) требуется поток энергии $12 \text{ эрг} \cdot (\text{см}^2 \cdot \text{с})^{-1}$. Измеренное значение полного потока в предположении изотропии составило $12,6 \text{ эрг} \cdot (\text{см}^2 \cdot \text{с})^{-1}$. Те же величины для спектра № 7 составили соответственно $10 \text{ эрг} \cdot (\text{см}^2 \cdot \text{с})^{-1}$ и $8,4 \text{ эрг}$. Приполюсная часть области интенсивного свечения связана с значительным и сильно варьирующим высыпанием электронов в области электромагнитного скачка (см. ΔB_y в 9.30:40 UT).

Резюмируя, можно отметить, что как в вечернем, так и в утреннем сек-

торах MLT потоки частиц, продольные токи и интенсивность свечения тесно взаимосвязаны друг с другом. Пространственное распределение различных форм оптических эмиссий верхней атмосферы, прямо связанное с интенсивностью и спектром вторгающихся электронов, соответствует концепции, согласно которой вторжения жестких электронов и связанные с ними дискретные формы свечения более характерны для области вытекающего продольного тока; область же мягких вторжений и диффузные формы свечения присущи втекающему току. Полученная из модельных расчетов связь характеристик излучения верхней атмосферы в основных линиях и характеристик вторгающихся электронов при непосредственных наблюдениях качественно подтвердилась.

ЛИТЕРАТУРА

1. Klumppar D. M. J. Geophys. Res., 1979, v. 84, p. 6524.
2. Banmjothann W. Adv. Space Res., 1983, v. 2, p. 55.
3. Armstrong J. S., Akasofu S.-I., Rostoker G. J. Geophys. Res., 1975, v. 80, p. 575.
4. Kamide J., Akasofu S.-I. J. Geophys. Res., 1976, v. 81, p. 3999.
5. Arnoldy R. L. Geophys. Res. Lett., 1977, v. 4, p. 407.
6. Kamide J., Murphree G. S., Anger C. D. et al. J. Geophys. Res., 1979, v. 84, p. 4425.
7. Meng C. I. J. Geophys. Res., 1976, v. 81, p. 2771.
8. Lui A. T., Venkatesan D., Anger C. D. et al. J. Geophys. Res., 1977, v. 82, p. 2210.
9. Rees M. H., Luckey D. J. Geophys. Res., 1974, v. 79, p. 5181.
10. Аршинков И. С., Бочев А. С., Долгинов Ш. Ш. и др. Космич. исслед., 1983, т. 21, с. 710-717.
11. Ivanov I., Dachev Ts., Matveijchuk Ju. et al. Abstracts XXII COSPAR. Canada, May, 1982, p. 27.
12. Петков Н. П., Гогошева Ц. Н., Гогошев М. М. и др. III Междунар. семинар социалистических стран «Научное космическое приборостроение». Одесса, 1982. Тезисы докладов, с. 34.
13. Бочев А., Дачев Ц., Жузгов Л. Н. и др. Геомагнетизм и аэрномия, 1984, т. 24, с. 948.

Московский государственный университет
Институт ядерной физики

Поступила в редакцию
28.V.1985