

ВЫСОТНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТОКОВ ЭЛЕКТРОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ БОЛЬШЕ 40 КЭВ НА СРЕДНИХ ШИРОТАХ

Грачев Е. А.¹, Григорян О. Р.¹, Кудела К.², Петров А. Н.¹, Шевелева В. Н.¹

¹*НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Россия*

²*Institute of Experimental Physics, Slovak Academy of Sciences, 04353 Kosice, Slovakia*

Представлены результаты анализа эксперимента на борту искусственного спутника «Активный» (высота 500-2500 км, наклонение 82.6°) по регистрации высыпаний электронов с энергией $E_e=40-500$ кэВ в области средних широт ($L=1.2-1.8$). Проанализирована зависимость потоков электронов от высоты, уровня геомагнитной активности и местного времени для различных энергий. Получено, что на $L=1.2-1.8$ на высотах 350 - 1300 км есть области повышенных потоков электронов, на высоте 1500 км эти области становятся размытыми по широте, они имеют долготную зависимость, а распределение электронов зависит от уровня геомагнитной активности и местного времени. Наличие потоков электронов в северном полушарии в области, магнитосопреженной Южно-атлантической аномалии (ЮАА) может быть обусловлено тем, что часть электронов, попавших в область ЮАА, отражается от атмосферы.

1. Введение

Изучение потоков заряженных частиц является одним из наиболее важных направлений в физике космического околоземного пространства. Анализ их пространственных и временных зависимостей позволяет не только уточнить радиационную обстановку на околоземной орбите, что существенно для предсказания сроков работы космических аппаратов, но и значительно расширить наши знания о процессах, происходящих в ближнем космосе. Области внутреннего и внешнего радиационных поясов изучаются давно, однако только в 1980-х годах впервые появились экспериментальные данные о наличии потоков электронов под внутренним радиационным поясом, а именно на $L < 1.9$. Потоки электронов регистрировались на средних широтах в различных экспериментах на космических аппаратах. Так, по экспериментальным данным ОК "Мир" (высота 400 км, электроны с энергией $E_e > 75$ кэВ [3, 4]), спутниках "Коронас-И" (500 км, $E_e > 500$ кэВ [5]) и OHZORA (350-850 км, $E_e = 190-3200$ кэВ [1]), под радиационными поясами Земли на $L = 1.2-1.8$ выделялись области, где регистрировались повышенные потоки электронов (рис. 1).

При сравнении этих данных хорошо видно, что границы областей высыпания электронов практически совпадают, положение рассматриваемых областей в целом стабильно во времени и пространстве, распределение потоков электронов имеет четко выраженную долготную зависимость.

Какой-либо модели явления, которая бы удовлетворительно объясняла повышенные потоки электронов на указанных L -оболочках, а также четко выраженную долготную зависимость, до сих пор предложено не было. В настоящее время есть две основные гипотезы [5], согласно которым высыпание электронов на $L = 1.6-1.8$ связано с работой коротковолновых передатчиков, либо является следствием глобальной грозовой активности.

2. Экспериментальные данные и обсуждение результатов

В настоящей работе анализируются распределения потоков электронов на $L = 1.2-1.8$ по данным ИСЗ "Активный", полученным в 1989-1990 гг. Спутник летал на высотах от 500 км до 2500 км, наклонение орбиты составляло 82.6° . Время активного существования спутника - с сентября 1989 по октябрь 1993, период обращения — 124 минуты [2].

Предыдущие эксперименты проводились в сравнительно узком интервале высот. Особенности орбиты спутника "Активный" позволили существенно расширить область наблюдений по высоте до 2500 км.

Электроны регистрировались тремя полупроводниковыми детекторами, ориентированными в трех взаимно перпендикулярных направлениях, толщиной 300 мкм и диаметром 8 мм каждый. Геометрический фактор — $0.03 \text{ см}^2 \text{ ср}$, время накопления частиц — 0.1 с, средний интервал между измерениями — 10 с. Защита от протонов с энергией $E_p < 0.5 \text{ МэВ}$ осуществлялась майларовой фольгой, которая устанавливалась перед детекторами. Весь интервал энергии $E_e = 40-500 \text{ кэВ}$ регистрируемых электронов был разделен на семь энергетических каналов. В работе анализируются данные, полученные с ИСЗ "Активный" в основном в течение 1990 года, то есть около 10000 витков.

Для каждого энергетического канала были построены карты распределения потоков электронов, на которых были выделены области на $L = 1.2-1.8$. На рис. 2 для высот 700 км, 900 км, 1100 км представлены распределения потоков электронов в географических координатах по данным одного из энергетических каналов ($E = 69.9-111.0 \text{ кэВ}$). Из полученных распределений можно сделать следующие выводы:

- области высыпания электронов под радиационными поясами на $L = 1.2-1.8$ находятся постоянно на высотах от 500 км до 1300 км, и в целом подобны в этом высотном интервале;
- потоки электронов наблюдаются на $L = 1.2-1.8$ как в северном полушарии на долготах от 90° до 350° , так и в южном полушарии, на долготах от 90° до 260° ;
- размеры областей по долготе практически не зависят от высоты вплоть до 1300 км; на больших высотах они становятся сильно «размытыми», и выделить их не представляется возможным;
- долготная ширина выделенных образований не зависит от энергии для электронов до 0.3 МэВ. При больших энергиях размеры областей уменьшаются. Полученный результат отличается от опубликованного в работе [5], где анализировались потоки электронов с энергией $E_e > 0.5 \text{ МэВ}$. Данное расхождение можно объяснить малым значением геометрического фактора детекторов ($0.03 \text{ см}^2 \text{ ср}$) на ИСЗ "Активный" (геометрический фактор детекторов в эксперименте на ИСЗ «Коронас-И» составлял $60 \text{ см}^2 \text{ ср}$).

В работах [1, 5] указывалось, что положение этих областей плохо коррелирует с уровнем геомагнитной активности. В данной работе были проанализированы распреде-

ления потоков электронов в широком диапазоне высот на выделенных L-оболочках в зависимости от уровня активности. Геомагнитные условия считались спокойными, если значение индекса D_{ST} лежало в диапазоне от -30 нТл до 0 нТл и возмущенными, если значение индекса D_{ST} меньше -30 нТл.

Были построены карты распределения потоков электронов в спокойных условиях и во время возмущений для всего рассматриваемого диапазона высот по шести энергетическим каналам от 40 кэВ до 500 кэВ. В качестве примера на рис. 3 показано распределение потоков электронов на высоте 700 км в спокойных условиях (рис. 3,А) и во время возмущений (рис. 3,В) для двух энергетических каналов ($E_e = 44.2-69.9$ кэВ и $E_e = 175.0-277.0$ кэВ).

Видно, что:

- в спокойных условиях область повышенных потоков электронов занимает $120^\circ - 300^\circ$ по долготе в северном полушарии, и $90^\circ - 200^\circ$ по долготе в южном полушарии;
- во время возмущений рассматриваемые области и в северном, и в южном полушариях «сдвигаются» в сторону больших долгот ($180^\circ - 360^\circ$ в северном полушарии, $170^\circ - 270^\circ$ в южном).

Во время возмущений электроны появляются в области, магнитосопряженной Южно-атлантической аномалии (ЮАА), что подтверждается результатами, опубликованными в работе [3]. Предполагается, что электроны частично отражаются в области аномалии и переходят в магнитосопряженную область в северном полушарии при совершаемом ими колебательном движении вдоль силовой линии. Согласно некоторым оценкам [6, 7] отраженный поток может составлять значительную часть потока падающих частиц. Это означает, что распределение потока частиц в конусе потерь перестает быть экспоненциальным.

Для проверки сделанного предположения были построены спектры электронов в области Южно-атлантической аномалии и в исследуемой области северного полушария. На рис. 4 представлен сравнительный анализ спектров электронов на $L = 1.2-1.4$ в северном полушарии и в ЮАА. На верхней панели исследуемые спектры аппроксимированы степенной функцией, на нижней - экспоненциальной. В таблице приведены показатели степенной α и экспоненциальной E_0 аппроксимаций и коэффициенты корреляции используемых аппроксимаций спектров электронов на высоте 700 ± 50 км. Из сравнения показателей видно:

- в пределах погрешности значения показателей степенной и экспоненциальной аппроксимаций одинаковы;
- аппроксимация экспоненциальной функцией оказывается более приемлемой (коэффициенты корреляции и в области ЮАА и в северном полушарии наиболее близки к единице).

Преыдущие эксперименты [5] показали, что сколько-нибудь выраженной зависимости потоков электронов на $L=1.2-1.8$ от местного времени не наблюдается. Однако

при анализе данных с ИСЗ "Активный" такая зависимость была обнаружена. Весь интервал местного геомагнитного времени (MLT) был условно поделен на день (06^h - 21^h MLT) и ночь (21^h - 00^h - 06^h MLT). На рис. 5 приведены распределения потоков электронов с энергией 44.2-69.9 кэВ (левая панель) и = 111.0-277.0 кэВ (правая панель) на высоте 700 км для ночных (верхняя панель) и дневных часов (нижняя панель).

Из рисунка видно, что:

- в северном полушарии область регистрации повышенных потоков электронов занимает более широкий интервал долгот в ночные часы по сравнению с дневными;
- в южном полушарии рассматриваемая область смещается в сторону больших долгот и сужается по широте;
- наблюдаемая зависимость потоков низко энергичных электронов на $L = 1.2$ - 1.8 от местного времени свидетельствует в пользу того, что причиной появления потоков электронов под радиационными поясами может являться работа коротковолновых радиопередатчиков с Земли, поскольку ночью условия распространения радиоволн в ионосфере значительно лучше, чем днем.

3. Выводы

- на $L=1.2$ - 1.8 в диапазоне высот от 350 км до 1300 км существуют области регистрации повышенных потоков электронов с энергией в десятки–сотни кэВ;
- рассматриваемые области имеют долготную зависимость;
- распределение электронов под радиационными поясами на $1.2 < L < 1.8$ зависит от геомагнитной активности;
- не все электроны, попавшие в область Южно-Атлантической Аномалии, погибают; часть их отражается от атмосферы в магнитосопряженную область;
- распределение электронов на $L=1.2$ - 1.8 зависит от местного времени.

1. Nagata K., Kohno T., Murakami H. et al., Electron (0.19-3.2 MeV) and proton (0.58-35 MeV) precipitations observed by OHZORA satellite at low zones $L=1.6$ - 1.8 // Planet. Space Sci., 36, 591 (1988).
2. Kudela K. et al., Inner zone electron peaks observed by the "Active" satellite // J. Geophys. Res., 97, 8681, (1992).
3. Biryukov A. S., Grigoryan O. R., Kuznetsov S. N. et al. Low-energy charged particles at near equatorial latitudes according to "MIR" orbital station data // Adv. Space Res. Vol. 17, No 10, pp (10)189-(10)192, (1996).
4. Biryukov A. S., Grigoryan O. R., Kuznetsov S. N. et al. Specific features of electron distributions at altitudes of 400 km // Adv. Space Res. Vol. 21, No 12, pp. 1665-1668 (1999).
5. Kuznetsov S. N., Myagkova I. N. Quasi-trapped electron fluxes (>0.5 MeV) under the radiation belts: analysis of their connection with geomagnetic indices // J. of Atm. And Solar-Terr. Phys., 64 (2002).
6. Spjeldvik W. N. Radiation belt electrons: structure of the loss cone // J. Geophys. Res., 1977, v82, n 4, pp 709-713.
7. Leinbach H., Willams D. J., Evidence for very weak pitch angle diffusion of outer zone electrons // J. Geophys. Res., 1977, v82, n 32, pp 5091-5098.

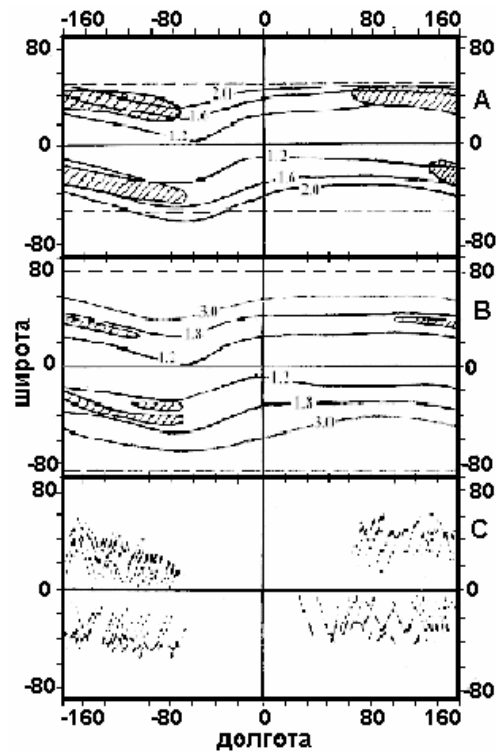


Рис 1. Высыпания электронов на средних широтах в экспериментах А - на станции МИР, В - на ИСЗ КОРОНАС-И, С- на ИСЗ ONZORA

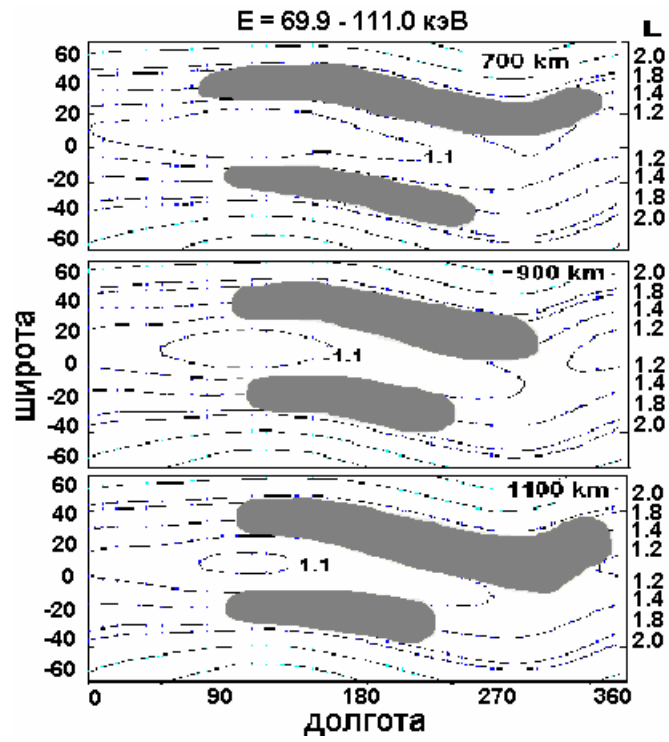


Рис 2. Распределение электронов с энергией $E = 69.9-111.0 \text{ кэВ}$ на $L = 1.2-1.8$ на высотах 700 км, 900 км, 1100 км

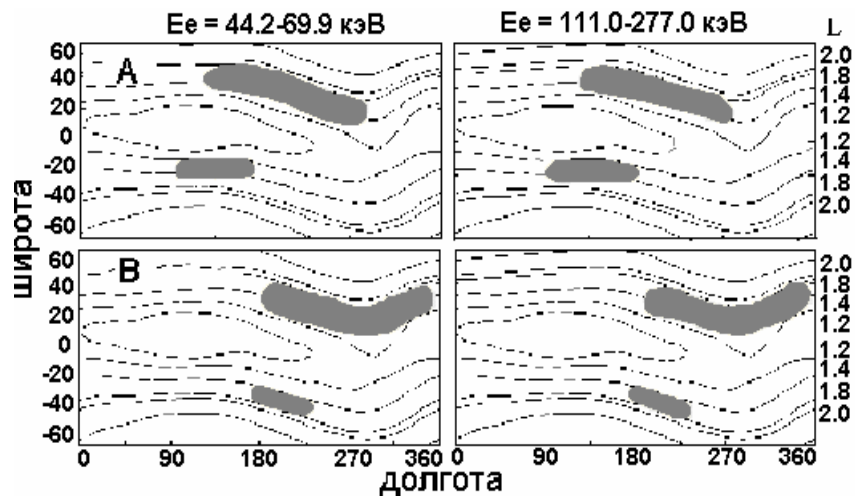


Рис 3. Распределение потоков электронов с энергией $E_e = 44.2-69.9$ кэВ (левая панель) и $E_e = 111.0-277.0$ кэВ (правая панель) на высоте $700(\pm 50)$ км А - в спокойных условиях, В - во время возмущений

Показатели степенной α и экспоненциальной E_0 аппроксимаций и коэффициенты корреляции используемых аппроксимаций спектров электронов на высоте 700 \pm 50 км

	Показатель степенной аппроксимации спектра α	Коэффициент корреляции	Показатель экспоненциальной аппроксимации спектра E_0 , кэВ	Коэффициент корреляции
На L=1.2-1.4 в северном полушарии	- 0.9 \pm 0.3	0.86	140 \pm 20	0.96
В ЮАА	- 0.94 \pm 0.07	0.99	160 \pm 20	0.97

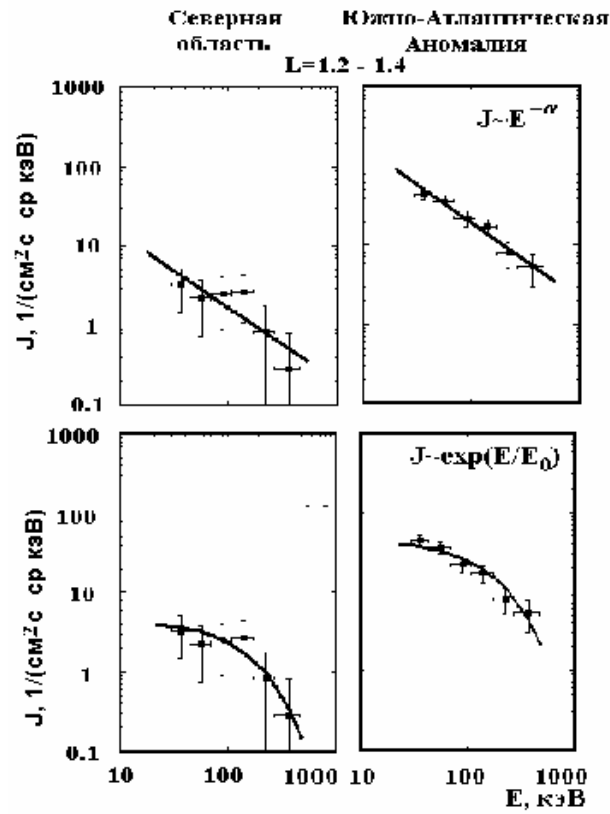


Рис. 4. Энергетический спектр электронов ($E_c=28-480$ кэВ) на $L=1.2-1.4$ в северном полушарии и в ЮАА на высоте 700 ± 50 км

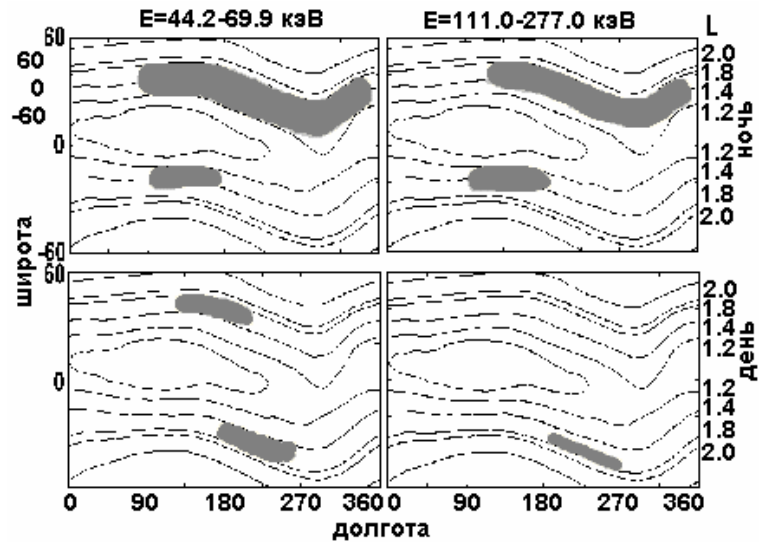


Рис 5. Распределение электронов ($E_e=44.2-69.9$ кэВ -левая панель, $E_e=111.0-277.0$ кэВ -правая панель) на $L=1.2-1.8$ на высоте $H=700 \pm 50$ км в зависимости от местного времени. Ночь: MLT = 21-00-06^h. День: MLT = 06-21^h