

## РЕГИСТРАЦИЯ ЭЛЕКТРОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ $\sim 100$ Мэв, ЗАХВАЧЕННЫХ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ ЗЕМЛИ

*Р.Н.Басилова, Н.Л.Григоров, Е.И.Коган-Ласкина,  
Г.И.Пугачева*

Обнаружены в районе экватора на высотах 200 – 250 км потоки квазизахваченных магнитным полем Земли электронов с энергией  $\sim 100$  Мэв.

В первых экспериментах по регистрации электронов высокой энергии в околосреднем космическом пространстве на ИСЗ [1, 2] были обнаружены потоки электронов с энергиями в десятки – сотни Мэв. Большая интенсивность этих потоков (порядка интенсивности первичных космических лучей) дала основание предположить возможность захвата геомагнитным полем электронов, выходящих из атмосферы [2].

Последующие эксперименты, выполненные с различной аппаратурой, уточнили абсолютные потоки электронов на разных геомагнитных широтах и вид энергетического спектра в интервале энергий 100–1000 Мэв [3, 4].

Появились теоретические работы, в которых показана возможность образования первичными космическими лучами пояса из электронов высокой энергии, захваченных геомагнитным полем на высотах, где долготный дрейф не будет приводить к их гибели в атмосфере, т. е. на высотах  $\gtrsim 1000$  км. На меньших же высотах могут существовать потоки электронов, квазизахваченных геомагнитным полем [5, 6].

Однако экспериментальных свидетельств существования в околоземном космическом пространстве захваченных или квазизахваченных электронов высокой энергии до сих пор не было.

(В дальнейшем мы будем называть квазизахваченными такие частицы, которые при своем движении в космическом пространстве из одного полушария в другое пересекают экваториальную плоскость по крайней мере более двух раз).

Чтобы обнаружить квазизахваченные частицы необходимо проводить измерения в таких условиях, в которых невозможна регистрация частиц прямого альбеда, т. е. частиц, вышедших из атмосферы на той же силовой линии магнитного поля, на которой находится регистрирующий прибор.

Электроны с энергиями  $\sim 100$  Мэв на высотах  $100 \div 1000$  км будут двигаться с сохранением магнитного момента, т. е. в каждой точке их траектории будет выполняться условие  $B/\sin^2 \alpha = \text{const}$ , где  $B$  — напряженность магнитного поля, а  $\alpha$  — питч-угол. Отсюда следует, что если электрон вышел из атмосферы с питч-углом  $\alpha(\lambda) = \pi/2$  на широте  $\lambda$ , где поле имело напряженность  $B(\lambda)$ , то в области с минимальным значением поля  $B_0$  (районе экватора) он будет иметь питч-угол  $\alpha_{max}$ :

$$\alpha_{max} = \arcsin \sqrt{B_0/B(\lambda)} \dots \quad (1)$$

Если же в точке выхода из атмосферы  $\alpha(\lambda) < \pi/2$ , то в районе экватора  $\alpha < \alpha_{max}$ .

Следовательно, все альбедные электроны в областях пространства близ геомагнитного экватора будут иметь углы с нормалью к силовой линии магнитного поля Земли  $\epsilon = \pi/2 - \alpha \gtrsim \pi/2 - \alpha_{max}$ .

Поэтому если проводить измерения узкоугольным телескопом с угловой апертурой  $\theta_0 < \epsilon$  в направлениях перпендикулярных к силовым линиям магнитного поля Земли, то в таких условиях частицы альбеда телескопом не будут регистрироваться.

Если ось телескопа направлена в зенит, то должно выполняться условие, чтобы минимальный угол  $\theta_{мин}$  между вектором скорости частиц и вертикалью был больше угловой апертуры телескопа  $\theta_0$ .

Обозначим угол наклонения магнитного поля в точке измерений через  $\psi$ . Тогда  $\theta_{мин} = \epsilon - \psi \gtrsim \pi/2 - (\alpha_{max} + \psi)$  и условие нерегистрации альбедных частиц примет вид

$$\pi/2 - (\alpha_{max} + \psi) \gtrsim \theta_0 \dots \quad (2)$$

Для экспериментального обнаружения квазизахваченных электронов мы использовали результаты измерений на ИСЗ "Космос-490" [7] на тех участках траектории ИСЗ, на которых  $0 \leq |\psi| \leq 7^\circ$ .

Для каждого такого участка был определен наибольший из возможных угол  $\alpha_{max}$ , исходя из условия, что альбедные электроны, оказавшиеся на выбранных участках траектории, выходят из атмосферы на высотах 30 км с питч-углами  $\alpha(\lambda) = 90^\circ$ . Были отобраны такие участки, для которых  $65^\circ \leq \alpha_{max} \leq 75^\circ$ . Все они показаны на рис. 1. Далее эти участки были разбиты на две группы по величине  $\alpha_{max}$ . В одной группе  $65^\circ \leq \alpha_{max} \leq 70^\circ$ , в другой  $70^\circ < \alpha_{max} \leq 75^\circ$ .

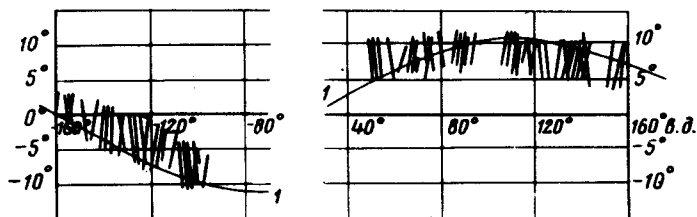


Рис. 1. Расположение отрезков траекторий, на которых проводились измерения, в западном и восточном полушариях: 1 — геомагнитный экватор

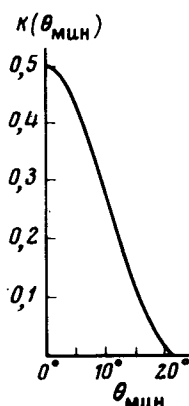


Рис. 2. Зависимость относительной "светосилы" прибора для альбедных частиц от  $\theta_{мин}$  — минимального угла между осью прибора и вектором скорости частиц

Результаты измерения потоков электронов на отобранных участках в восточном и западном полушариях приведены в таблице

	Западное полушарие		Восточное полушарие	
	$65^\circ \leq \alpha_{max} < 70^\circ$	$70^\circ < \alpha_{max} \leq 75^\circ$	$65^\circ \leq \alpha_{max} \leq 70^\circ$	$70^\circ < \alpha_{max} \leq 75^\circ$
$\langle \alpha_{max} \rangle$	68,1°	71,7°	68,1°	72,1°
$T, \text{сек}$	1020	1643	1108	2260
$N_{сф}$	72	119	64	131
$N_{бф}$	135	227	97	235
$J_e (E \geq 80 \text{ Мэв})$ $\text{м}^{-2} \text{сек}^{-1} \text{см}^{-1}$	$139 \pm 35$	$148 \pm 28$	$63 \pm 28$	$102 \pm 21$

В таблице в первой строке приведено среднее значение  $a_{max}$  на участках траектории, вошедших в соответствующую группу.  $T$  — полное время измерений.  $N_{сф}$  и  $N_{бф}$  — число зарегистрированных частиц с фильтром и без него, соответственно. В последней строке поток электронов с энергией  $E \geq 80$  Мэв, который определялся по формуле

$$J_e = \frac{(N_{бф} - 1,07N_{сф})}{\Gamma_0 T} 10^4 \text{ м}^{-2} \text{ сек}^{-1} \text{ стерад}^{-1} \cdot \Gamma_0 = 4,1 \text{ см}^2 \cdot \text{стерад}$$

Различие интенсивностей первичных космических лучей на 25% в западном и восточном полушариях из-за разных магнитных жесткостей (13 и 15 Гв, соответственно), может приводить к изменению на 25% квазизахваченных электронов, рождаемых космическими лучами в верхней части атмосферы.

Оценим вклад электронов альbedo в измеренные потоки.

Альбедные частицы на участке траектории с углом наклонения магнитного поля  $\psi$  имеют углы с вертикалью  $\theta > \theta_{min} = 90^\circ - (a_{max} \pm \psi)$ . (Разные знаки перед  $\psi$  для частиц из разных полушарий).

Для частиц, имеющих углы с вертикалью  $\theta \geq \theta_{min}$  геометрический фактор прибора  $\Gamma(\theta_{мин})$  составляет некоторую долю от полного геометрического фактора  $\Gamma_0$ , т. е.  $\Gamma(\theta_{мин}) = \Gamma_0 K(\theta_{мин})$ . Зависимость  $K$  от  $\theta_{мин}$  приведена на рис. 2. Она была рассчитана из геометрических данных нашего прибора с учетом того, что альбедные частицы регистрируются прибором в ограниченном интервале азимутальных углов  $0 \leq \phi \leq 2a_{max}$ . (При вычислении  $\Gamma_0$   $\phi$  изменяется в интервале  $0 \leq \phi \leq 2\pi$ ).

Пользуясь данными рис. 2 и считая, что в пределах длины отобранных отрезков траекторий наклонение магнитного поля меняется линейно от  $-\psi_{max}$  до  $+\psi_{max}$  можно получить среднее значение геометрических факторов для регистрации альбедных частиц в зависимости от

$$\text{величины } a_{max}: \langle \Gamma_a \rangle = \Gamma_0 / 2 \int_{-\psi_{max}}^{+\psi_{max}} K[\theta_{min}(\psi)] d\psi.$$

Так, для  $a_{max} = 70^\circ$   $\langle \Gamma_a \rangle = 0,09\Gamma_0$  и для  $a_{max} = 75^\circ$   $\langle \Gamma_a \rangle = 0,32\Gamma_0$ .

В качестве потока альбедных электронов примем наибольший из измеренных потоков электронов на экваторе в  $\sim 75 \text{ м}^{-2} \text{ сек}^{-1} \text{ стерад}^{-1}$  при измерениях глобальной (усредненной по всем направлениям) интенсивности электронов на ИСЗ "Протон-4" [3]. При таком потоке альбедных электронов их вклад в измеренные потоки составит: на траекториях с  $a_{max} \leq 70^\circ$   $J_{альб} \leq 0,09 \cdot 75 = 7 \text{ м}^{-2} \text{ сек}^{-1} \text{ стерад}^{-1}$ , а на траекториях с  $70^\circ < a_{max} \leq 75^\circ$   $J_{альб} \leq 0,32 \cdot 75 = 24 \text{ м}^{-2} \text{ сек}^{-1} \text{ стерад}^{-1}$ . После вычитания этих потоков из измеренных получим потоки электронов, которые не являются электронами альbedo: на траекториях где  $65^\circ \leq a_{max} \leq 70^\circ$   $I = J_e - J_{альб} \geq 139 \pm 35 - 7 = 132 \pm 35 \text{ м}^{-2} \text{ сек}^{-1} \text{ стерад}^{-1}$  (в западном полушарии) и  $J_e - J_{альб} = 63 \pm 28 - 7 = 54 \pm 28 \text{ м}^{-2} \text{ сек}^{-1} \text{ стерад}^{-1}$  (в восточном полушарии). На траекториях, где  $70^\circ < a_{max} \leq 75^\circ$ , соответственно,  $I \geq 148 \pm 28 - 24 = 124 \pm 28 \text{ м}^{-2} \text{ сек}^{-1} \text{ стерад}^{-1}$  и  $I \geq 102 \pm 21 - 24 = 78 \pm 21 \text{ м}^{-2} \text{ сек}^{-1} \text{ стерад}^{-1}$ .

Средние значения интенсивностей для  $65^\circ \leq \alpha_{max} \leq 75^\circ$  равны: в западном полушарии  $\langle I \rangle = 128 \pm 22 \text{ м}^{-2} \text{ сек}^{-1} \text{ стерад}^{-1}$  и в восточном —  $\langle I \rangle = 70 \pm 17 \text{ м}^{-2} \text{ сек}^{-1} \text{ стерад}^{-1}$ .

Так как по условиям регистрации эти потоки электронов не могут быть обусловлены электронами альбедо, то у них должны быть питч-углы  $\alpha > \alpha_{max}$ . При таких питч-углах зеркальные точки для этих электронов на траекториях, на которых они зарегистрированы, будут лежать выше областей атмосферы откуда выходят альбедные электроны. Поэтому эти электроны должны будут испытать несколько отражений в зеркальных точках прежде чем они потеряют свою энергию. Следовательно, они должны быть отнесены к категории квазизахваченных частиц.

Таким образом, полученные экспериментальные данные позволяют утверждать, что на высотах 200 — 250 км в районе экватора обнаружены потоки электронов с энергиями  $\sim 100 \text{ Мэв}$ , квазизахваченных магнитным полем Земли. Интенсивности их потоков близки к интенсивности первичных космических лучей в соответствующих полушариях.

Институт ядерной физики  
Московского

государственного университета  
им. М.В.Ломоносова

Поступила в редакцию  
20 января 1978 г.

## Литература

- [1] Н.Л.Григоров, Д.А.Журавлев, М.А.Кондратьева и др. Изв. АН СССР, сер. физ., **28**, 2035, 1964.
- [2] Н.Л.Григоров, Ю.С.Клинцов, В.Е.Нестеров и др. Изв. АН СССР, сер. физ., **30**, 1773, 1966.
- [3] Р.Н.Басилова, Н.Л.Григоров, Л.Ф.Калинкин и др. Космические исследования, **11**, 160, 1973; **11**, 627, 1973; **11**, 710, 1973.
- [4] Л.В.Антоненко, В.Л.Бельшев, И.Н.Капустин и др. Космические исследования, **15**, 589, 1977.
- [5] Н.Л.Григоров. ДАН, **234**, 810, 1977.
- [6] Ю.А.Александров, С.Н.Кузнецов, Ю.И.Логачев и др. Космические исследования, **15**, 223, 1977.
- [7] Р.Н.Басилова, Н.Л.Григоров, Л.Ф.Калинкин и др. Космические исследования, **15**, 579, 1977.