

РАДИОИЗЛУЧЕНИЕ В ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ АТМОСФЕРНЫХ ЛИВНЯХ

Р. У. Бейсембаев, Ю. Н. Вавилов, В. Д. Воловик

УДК 537.591

Рассмотрен вопрос о пороге регистрации радиоизлучения горизонтальных широких атмосферных ливней космических лучей в связи с установлением его природы как когерентного синхротронного излучения в геомагнитном поле.

Исследование свойств радиоизлучения ШАЛ привело к установлению его геомагнитной природы, вполне объяснимой свойствами когерентного синхротронного излучения /1/. При этом существенными в формировании поля излучения на уровне наблюдения оказываются детали продольного /2/ и поперечного /3/ развития ливня, так что наблюдается своеобразная интерференционная картина, четкое разрешение которой можно ожидать лишь в горизонтальных ШАЛ (ГШАЛ).

Рассмотрим вопрос о пороге регистрации ГШАЛ по радиоизлучению. Мощность когерентного синхротронного излучения  $P_\omega$  в единичном интервале частот  $d\omega$  можно представить в виде /4/:

$$dP_\omega \approx 2c \left( \frac{H}{\gamma} \right)^2 \left( \frac{e^2 N_1}{mc^2} \right)^2 \left( \frac{\omega}{\omega_H} \right)^{1/3} \frac{d\omega}{\omega_H}, \quad (I)$$

где  $e$ ,  $m$  - заряд и масса электрона;  $c$  - скорость света в вакууме;  $\omega_H = eH_1/\gamma mc$  - гиромагнитная частота электрона;  $H_1 = H_c \sin \alpha$  - нормальная оси ГШАЛ составляющая геомагнитного поля  $H_0$ ,  $\alpha$  - угол между  $H_0$  и направлением оси ГШАЛ;  $\gamma$  - среднее значение Лоренц-фактора излучающих ливневых электронов и позитронов.

Выражение (I) справедливо при выполнении таких условий:

$$1 \ll \omega/\omega_H \ll \gamma^3; \quad \omega \ll 2\pi c \min \left\{ \frac{1}{R}, \frac{\gamma}{R} \right\}, \quad (2)$$

где  $\bar{h}$  - средняя толщина ливневого сгустка,  $\bar{r}$  - среднее значение поперечника ливневой лавины.

Если положить площадь пятна радиоизлучения  $S = \pi(L/\bar{r})^2$ , для потока энергии радиоизлучения можно записать выражение:

$$d\Pi_{\omega} \approx dP_{\omega}/S \approx 2 \left( \frac{\delta N_e}{L} \right)^2 \left( \frac{\omega_H}{\pi c} \right)^2 \omega^{1/3} d\omega, \quad (3)$$

где  $L$  - расстояние от уровня наблюдения до максимума развития каскада ПШАЛ.

Выполнение условий (2) при  $\bar{r} \approx 40$  приводит к тому, что  $\omega/\omega_H \approx 10$  т.е. наиболее эффективна регистрация ПШАЛ в диапазоне декаметровых волн, на длине волны  $\lambda \approx 50$  м. В этом случае ограничение на величину порога регистрации накладывают атмосферные помехи, среднее значение которых равно  $/5/$ :

$$d\Pi_{\omega}^n \approx 2,65 \cdot 10^{-17} d\omega \text{ эрг/см}^2. \quad (4)$$

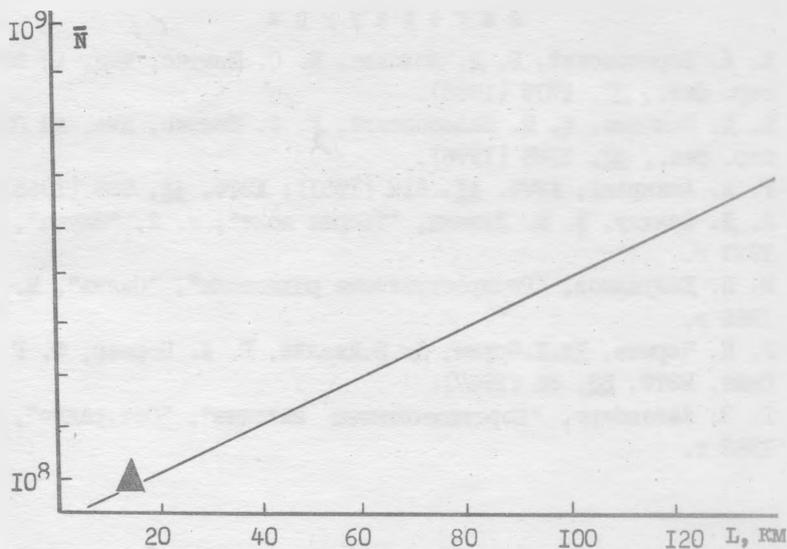
Теперь среднее значение мощности регистрируемого по радиоизлучению ПШАЛ можно найти, полагая отношение (3) к (4) равным, например, десяти ( $d\Pi_{\omega}/d\Pi_{\omega}^n = 10$ ):

$$\bar{N} = 3,63 \cdot 10^{-9} \frac{L}{\bar{r}} \left( \frac{\pi c}{\omega_H} \right)^{1/2} \left( \frac{\omega_H}{\omega} \right)^{1/6}, \quad (5)$$

так что при  $\bar{r} \approx 40$ ,  $\omega/\omega_H \approx 10$  получим  $\bar{N} \approx 50L$ .

На рис. I показана зависимость мощности регистрируемого ливня от расстояния до области максимума его развития. Так как среднее значение атмосферных помех на длине волны  $\lambda = 50$  м равно максимальному уровню помех на длине волны  $\lambda = 7,4$  м, выбранной Джелли и др. /6/ для регистрации радиоизлучения ПШАЛ под углом  $70^\circ$ , представляется возможным провести абсолютную калибровку результатов расчета. На рис. I данные Джелли и др. показаны треугольником, так что пересчет от мощности ливня к первичной энергии  $E_0$  следует производить по формуле  $E_0 = 10^9 \bar{N}$ . Таким образом, диапазон реально контролируемых по радиоизлучению зенитных углов простирается от  $75$  до  $85^\circ$  ( $L \approx 20 + 100$  км).

В связи с тем, что радиоизлучение в волновой зоне представляет собой ярко выраженную интерференционную картину /2/, следует контролировать приемными антеннами всю площадь радиопятна  $S$ . Так как чувствительная площадь антенны  $S_a = \lambda^2 D_a / 4\pi$ , то число



Р и с. I.

таких антенн равно  $n_a = S/S_a = (2\pi L/\gamma\lambda)^2 1/D_a$ . При  $\bar{\gamma} = 40$ ,  $\lambda = 50$  м,  $L = 100$  км и коэффициенте направленного действия антенны  $D_a = 4 \cdot 10^2$   $n_a \approx 250$ . Подобным коэффициентом направленного действия обладает, например, однопроводная антенна бегущей волны [7], подвешенная на высоте 7 м, имеющая длину приемного провода  $l = 700$  м, так что основной лепесток диаграммы направлен под зенитным углом  $\sim 80^\circ$  (вдоль длины провода) и имеет ширину  $\pm 5^\circ$  на уровне половинной чувствительности.

Режим приема ПШАЛ по радиоизлучению заключается в регистрации на центральном пункте многократных совпадений ( $\sim 10$ ) с последующей записью радиоимпульсов от всей совокупности антенн на суммирующем усилителе и на многоканальном анализаторе. Если же вырабатывается импульс управления от детектора  $\mu$ -мезонов, то запуск сумматора и анализатора можно производить от этого импульса.

Поступила в редакцию  
6 сентября 1979 г.

## Л и т е р а т у р а

1. И. А. Боршковский, В. Д. Воловик, Е. С. Шматко, Изв. АН СССР, сер. физ., 30, 1705 (1966).
2. В. Д. Воловик, И. И. Залобовский, Е. С. Шматко, Изв. АН СССР, сер. физ., 40, 1026 (1976).
3. Г. А. Аскаръян, ЖЭТФ, 41, 616 (1961); ЖЭТФ, 48, 988 (1965).
4. Л. Д. Ландау, Е. М. Лившиц, "Теория поля", т. 2, "Наука", М., 1973 г.
5. М. П. Долуханов, "Распространение радиоволн", "Связь", М., 1965 г.
6. У. Н. Чармен, Дж.Х.Фруин, Дж.В.Джелли, Р. А. Портер, Ф. Г. Смит, ЖЭТФ, 53, 88 (1967).
7. Г. З. Айзенберг, "Коротковолновые антенны", "Сов.радио", М., 1962 г.