

К ВОПРОСУ ОБ ОБЛАСТИ ГЕНЕРАЦИИ ЕСТЕСТВЕННЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ ВНЕШНЕЙ ИОНОСФЕРЫ НА ЧАСТОТАХ НИЖЕ 300 Гц

П.В.Вакулов, Б.Добровольская, А.В.Захаров,
М.С.Ковнер, С.Н.Кузнецов, В.А.Кузнецова,
В.И.Ларкина, Я.И.Лихтер,

Обнаруженные на ИСЗ особенности пространственно-временного распределения естественного излучения внешней ионосферы объясняются в предположении, что излучение возбуждается на высотах $300 \pm 400 \text{ км}$.

Измерения проводились на спутнике "Интеркосмос-5" с декабря 1971 г. по апрель 1972 г. на высотах $200 \leq h \leq 1200 \text{ км}$ на двенадцати селективных частотах $70 \text{ Гц} \leq f \leq 20 \text{ кГц}$. При этом параметр L изменился в пределах $1,1 \leq L \leq 5$ ($L = R_{\text{экв}} / R_3$ — отношение геоцентрического расстояния до вершины силовой линии в экваториальной плоскости к радиусу Земли). Порог чувствительности приемника по амплитуде магнитного поля составляет $b_0 = 4,5 \cdot 10^{-11} \text{ Гс} \cdot \text{кГ}^{-1/2}$ или по мощности излучения $= 1,6 \cdot 10^{-22} \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-3} \cdot \text{Гц}$ [1].

Установлены следующие экспериментальные факты.

1. Интенсивность излучения максимальна в дневные часы местного времени ($7^h + 17^h LT$) и минимальна в ночные. Все последующие характеристики будут приведены для дневного местного времени.

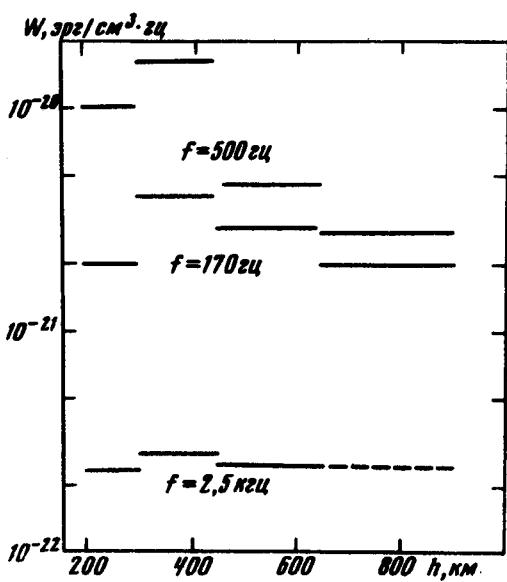
2. На различных L -оболочках спектры излучения во всем частотном диапазоне оказались подобными. Максимум излучения лежит в интервале $0,3 \leq f (\text{кГц}) \leq 1,6$.

3. С ростом L -оболочки интенсивность излучения увеличивается. На частоте $0,5 \text{ кГц}$ поле волны растет, начиная с $L \approx 1,1$ до $L \approx 3 + 3,2$, затем примерно постоянно. Интенсивность на частоте $f = 2,5 \text{ кГц}$ заметно возрастает с $L \approx 2$ и достигает максимума на $L \approx 3$. Уровень излучения на частоте $0,5 \text{ кГц}$ на порядок величины выше уровня на $f = 2,5 \text{ кГц}$.

4. На данной L -оболочке имеется максимум интенсивности излучения на высоте $300 + 400 \text{ км}$ для $f = 0,5 \text{ кГц}$. С увеличением высоты до $\sim 1000 \text{ км}$ интенсивность излучения падает на порядок величины. Для частоты $f = 2,5 \text{ кГц}$ эта закономерность не наблюдается (рисунок).

5. На фиксированных L -оболочке и высоте в пределах ионосферных высот геомагнитная индукция под разными районами Земли изменяется в пределах $0,25 \leq B \leq 0,55 \text{ Гс}$. Интенсивность излучения на $f = 0,5 \text{ кГц}$ уменьшается с ростом B примерно в 10 раз, а на частоте $2,5 \text{ кГц}$ наблюдается увеличение интенсивности примерно в два раза ($L \approx 2$; $h \in 200 + 300 \text{ км}$).

Перечисленные выше закономерности, обусловленные, очевидно, особенностями возбуждения и распространения волн низкой частоты, дают основание утверждать, вопреки распространенному представлению (см., например, [2]), что по крайней мере часть излучения возникает на ионосферных высотах и оно генетически связано с энергичны-



Усредненный высотный ход интенсивности излучения на частотах 170, 500 и 2500 Гц

ми протонами и электронами радиационных поясов. Основанием для такого утверждения является следующее.

На рассматриваемых L -оболочках на больших высотах, как известно в спокойных условиях отсутствует асимметрия день-ночь в распределении высокозергичных частиц. Кроме того при $h > 1000 \text{ км}$ концентрация ионосферной плазмы днем и ночью почти не изменяется. Поэтому, если бы излучение генерировалось на больших высотах вблизи экватора, то было бы трудно понять зависимость интенсивности излучения от местного времени. Повышенный уровень излучения днем обус-

ловлен, очевидно, тем, что на ионосферных высотах в освещенной Солнцем области концентрация электронов много больше, чем почью. Это приводит к тому, что фазовая скорость низкочастотных волн на дневной стороне относительно меньше (примерно на порядок величины). В этом случае, как следует из необходимых условий черенковского и магнитотормозного излучений, число излучающих частиц резко увеличивается и, следовательно,растет уровень возбуждаемого излучения. Этот эффект должен отсутствовать, если генерация происходит высоко вне ионосферы. Более того при этом можно было бы ожидать, что уровень на малых высотах был бы почью выше, так как в это время концентрация заряженных частиц в ионосфере и эффективное число соударений значительно меньше, т.е. меньше поглощение волн приходящих сверху.

Высотный ход интенсивности излучения говорит о том, что излучение идет вверх и вниз от уровня $300 + 400 \text{ км}$. Рассмотрим изменение амплитуды этих волн в ионосфере. В приближении геометрической оптики поле волны b изменяется с расстоянием как

$$b \approx n^{\frac{1}{2}} \exp \left(-\frac{\omega}{c} \int_{b_1}^{b_2} \kappa dz \right) ,$$

где n — показатель преломления, κ — показатель поглощения. Параметры ионосферы таковы [3], что величина $n^{\frac{1}{2}}$ изменяется примерно в два раза и экспонента приблизительно в два раза в интервале высот $300 + 800 \text{ км}$. Т.е. по рассматриваемой трассе уровень излучения на частоте $0,5 \text{ кГц}$ убывает в десять раз при распространении волны от Земли вверх, что хорошо согласуется с экспериментом.

Отсутствие высотного хода на частоте $f = 2,5 \text{ кГц}$ удается объяснить из предположения, что это излучение приходит сверху. Амплитуда волны b из-за роста n увеличивается вдвое, поглощение же уменьшает амплитуду приблизительно в два раза. В итоге поле волны остается приблизительно неизменным.

Таким образом в рамках предположения, что непрерывное КНЧ излучение в диапазоне $0,5 \text{ кГц}$ генерируется на малых высотах, а на $f = 2,5 \text{ кГц}$ в окрестности магнитного экватора на низких широтах, удается понять наблюдаемый высотный ход плотности энергии волн.

Часто вблизи $f = 500 \text{ Гц}$ по наземным данным отсутствует корреляция излучений в магнитосопряженных районах. Это также говорит о малой вероятности излучения в окрестности вершины силовой линии, иначе трудно было бы понять отсутствие сигнала в одной из сопряженных точек. Отметим также, что при генерации волн в окрестности экватора не должна была бы проявляться зависимость излучения от локальных значений геомагнитного поля на уровне ИСЗ.

Что касается роста интенсивности излучения с увеличением геомагнитной широты (L -оболочки), то это может быть результатом распущей с широтой концентрации энергетических частиц (протонов и электронов), ответственных за возбуждение волн.

В заключение подчеркнем, что в предположении когерентного циклотронного или черенковского излучений протонов (электронов) получается верхняя оценка потока энергий излучения $10^{-13} \text{ вт/м}^2 \cdot \text{Гц}$ близкая к измеренным значениям. Отметим, что хотя на ионосферных вы-

сотах энергичных частиц намного меньше, чем на экваторе, тем не менее их функция распределения наиболее анизотропна, так как имеются в основном частицы с питч углами, близкими к $\pi/2$. Это с необходимостью должно приводить к излучению с максимально возможными инкрементами.

Авторы благодарны И.Г.Клейменовой за обсуждение результатов и полезные замечания.

Институт земного магнетизма
ионосферы и распространения радиоволн
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
8 сентября 1975 г.

Литература

- [1] F. Jiříček et al. Studia Geophysica et Geodetica., 17, 43, 1973.
 - [2] B.T.Tsurutani et al. J.Geophys. Res., 80, 600, 1975.
 - [3] Я.Л.Альперт, З.П.Гусева, Д.С.Флигель. Распространение низкочастотных электромагнитных волн в волноводе Земля-ионосфера. М., изд. Наука, 1967.
-