

О ПРИРОДЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ В ПОЛЯРНОЙ ШАПКЕ

*Ю.В.Голиков, В.В.Пустовалов, А.Б.Романов,
В.П.Силин, В.Т.Тихончук, В.А.Троицкая*

Обнаружена зона повышенного электромагнитного излучения в полярной шапке Земли. Показано, что это излучение генерируется потоками электронов с малой энергией. Теоретически рассчитанные уровень и спектральное распределение турбулентных шумов находятся в согласии с результатами наземных измерений и измерений с помощью искусственных спутников Земли.

В полярной магнитосфере Земли, в области так называемого полярного дневного каспа¹⁾ постоянно регистрируются потоки электронов с энергией $100 + 200$ эв и плотностью частиц $10^{-2} + 10^{-3}$ см. Такие частицы солнечного ветра проникают через дневной касп из переходной области в магнитосферу Земли вплоть до высот порядка 1000 км [1,2]. Экспериментально доказано с помощью спутников, что эти потоки генерируют очень низкочастотный (ОНЧ) шум в широком диапазоне частот (вплоть до 1 МГц) [3]. Ниже показано, что характеристики ОНЧ шума

¹⁾ Дневной касп — узкая область в полярной магнитосфере Земли с ослабленным магнитным полем, служащая границей раздела между замкнутыми силовыми линиями магнитного поля дневной стороны и незамкнутыми силовыми линиями, уходящими в хвост магнитосферы [1].

в каспе непосредственно связаны с параметрами электронных потоков, т. е. измерения ОНЧ шумов могут быть использованы для диагностики параметров частиц солнечного ветра, проникающих в область дневного каспа. Это представляется весьма важным, так как геометрия и состояние магнитосферы зависят от параметров солнечного ветра. Изучение ОНЧ шумов может быть выполнено с помощью сети наземных станций без привлечения космических аппаратов.

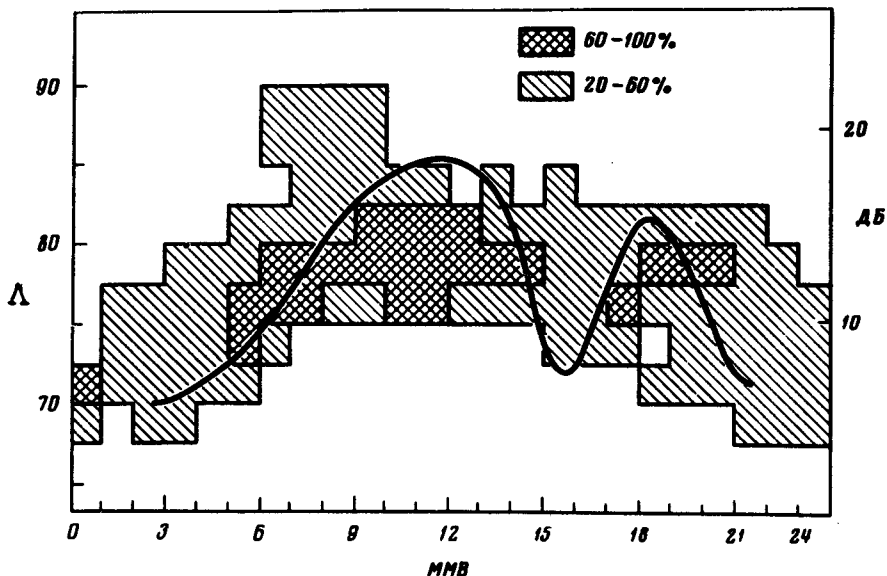


Рис. 1. Вариация интенсивности ОНЧ-шумов (в децибелах) в зависимости от местного магнитного времени (ММВ) (сплошная кривая) на 79° геомагнитной широты. Распределение вероятности выпадения мягких электронов в зависимости от геомагнитной широты Λ и ММВ (по данным спутника OGO-4 [4])

Для исследования возможности регистрации ОНЧ-излучения, приходящего из дневного каспа, впервые были выполнены синхронные измерения характеристик ОНЧ-шума в Антарктиде на передвижной станции, пересекавшей несколько раз область каспа, и на двух контрольных станциях – ст. Мирный, находящейся на 77° геомагнитной широты (ГШ) и, ст. Восток (геомагнитный полюс). Эти измерения обнаружили зону повышенного излучения в районе проекции центра полярного каспа на поверхность Земли ($\sim 79^\circ$ ГШ при слабой магнитной активности). В суточном ходе интенсивности ОНЧ-шума (см. кривую на рис. 1) обнаружено два максимума: первый – около 12-00 часов местного магнитного времени (ММВ), второй – вблизи 18-00 часов ММВ. Кроме этой кривой на рис. 1 приведена зависимость вероятности выпадения электронов с энергиями до $0,7$ кэВ от геомагнитной широты и времени суток, построенная по данным измерений спутника OGO-4 [4]. Совпадение по времени всплесков ОНЧ-излучения с максимумами вероятности появления мягких электронов указывает, на то, что потоки электронов в дневном каспе генерируют ОНЧ-колебания, регистрируемые затем на Земле.

Спектральный анализ сигналов, зарегистрированных одновременно в зоне повышенного излучения ($\sim 79^\circ$ ГШ) и вне его (на ст. Мирный $\sim 77^\circ$ ГШ), показывает на качественное различие их спектров: в зоне повышенного излучения присутствует высокочастотная компонента шума от 5 кГц и выше. Эта частота (5 кГц) совпадает с крайней частотой нижнего гибридного резонанса (НГР) $\omega_{L_i} (1 + \omega_{L_e}^2 / \Omega_e^2)^{-1/2}$ на высоте порядка 1000 км полярной ионосферы.

Приведенные выше экспериментальные факты позволяют сделать вывод о том, что электронные потоки в районе полярного каспа возбуждают колебания на частотах НГР. Часть энергии этих колебаний, трансформирующаяся на неоднородностях плотности ионосферы в свисты, регистрируется наземными станциями в виде ОНЧ шума. Спектральное распределение интенсивности и уровень ОНЧ шумов определяются нелинейными процессами, которые ограничивают экспоненциальное нарастание волн, генерируемых пучком волн, и тем самым насыщают неустойчивость.

Нами построена нелинейная теория насыщения возбуждаемых электронным пучком НГР волн, причем в качестве стабилизирующего эффекта рассмотрен главный нелинейный процесс — индуцированное рассеяние НГР колебаний на электронах и ионах ионосферной плазмы (ср. [5]). Результаты теории и их сопоставление с данными, полученными спутниками Injun-5 [6] и ISIS-1 [7], приведены в работе [8]. Подчеркнем, что получено хорошее согласие как по спектральному составу, так и по полной интенсивности измеренных в [6, 7] ОНЧ шумов. Описанные выше новые данные, полученные с помощью наземной аппаратуры в Антарктиде также могут быть интерпретированы с помощью теории турбулентности НГР волн. Так, согласно теории, квазистационарное спектральное распределение энергии НГР волн $S(\omega)$ определяется превышением $p = u_b / u_{\text{пор}}$ скорости пучка u_b порогового для возбуждения неустойчивости значения $u_{\text{пор}} = 1,14 r_{D_b} (\omega_{L_e} \nu_e)^{1/2}$ и дается формулой (см. [8])

$$S(\omega) \sim \left(\frac{\omega_{L_e}}{\omega} \right) \left(\frac{\omega}{\omega_{L_e}} - 1 - p^2 \frac{\omega}{\omega_{L_e}} \ln \frac{\omega}{\omega_{L_e}} \right), \quad \omega_1 \leq \omega \leq \omega_{L_e},$$

где нижняя граница спектра определяется уравнением

$$\omega_1 = \omega_{L_e} [1 + p^2 \ln \omega_{L_e} / \omega_1]^{-1}.$$

Расчетная кривая спектрального распределения $S(\omega)$ приведена на рис. 2 пунктиром. Из этого рис. 2 видно, что в диапазоне до 10 кГц наб-

¹⁾ Здесь и ниже использованы следующие обозначения: Ω_e — электронная циклотронная частота; $\omega_{L_e}, \omega_{L_i}$ — ленгмюровские частоты электронов и ионов соответственно, ν_e — частота столкновений электронов плазмы с ионами и нейтралами, r_{D_b} — дебаевский радиус электронов пучка.

людаемые экспериментально (сплошная кривая) рост интенсивности ОНЧ шумов отвечает росту спектральной интенсивности (1) НГР волн. В области частот от 8 до 10 MГц экспериментально и теоретически полученные интенсивности шума совпадают. Для более полного сопоставления развиваемой теории [8] и эксперимента желательно расширить диапазон регистрируемых частот ОНЧ излучения в область более высоких частот в районе дневного каспа. Кроме того, желательно изучить изменение во времени интенсивности ОНЧ излучения, так как, согласно теоретическим представлениям, релаксация шума к распределению (1) происходит осцилляторно во времени с частотой $0,3\nu_e u_b \nu_{Te}^{-1} (p^2 e^{p-2} - 1)$ (ν_{Te} — тепловая скорость электронов ионосферной плазмы). В условиях верхней полярной ионосферы эта частота составляет $\sim 100 \text{ MГц}$.

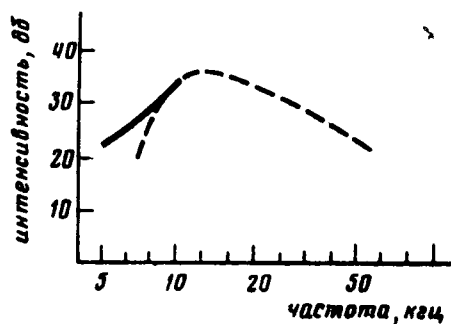


Рис. 2. Спектральное распределение интенсивности ОНЧ шумов, измеренное на 79° геомагнитной широты (ГШ) (сплошная кривая). Пунктиром изображено распределение, рассчитанное по формуле (1) при $\omega_{Le}/2\pi = 1 \text{ MГц}$ и $p = 5,4$

Подчеркнем, что измерение временных и спектральных характеристик ОНЧ шума на Земле позволяет получить достаточно полную информацию о параметрах пучка высыпающихся электронов. Так измерение отношения частоты релаксационных колебаний шума к декременту их затухания, равное согласно теории $\sim 0,3 u_b / \nu_{Te}$, позволит вычислить скорость u_b электронов пучка (предполагается, что температура электронов ионосферной плазмы известна). Кроме того, определение частоты, соответствующей максимуму интенсивности ОНЧ шумов позволяет найти величину $p = u_b / u_{\text{пор}}$ и по известному u_b пороговую для раскачки неустойчивости скорость пучка и тем самым концентрацию высыпающихся электронов.

Таким образом, если дальнейшие наблюдения подтвердят правильность предлагаемой теории, то открывается принципиально новая возможность измерения параметров электронных пучков в полярных районах с помощью регистрации ОНЧ шумов сетью постоянно действующих наземных станций, пересекающих область каспа. Такие станции могли бы следить также за пространственно-временными перемещениями каспа, связанном с динамикой геометрии магнитосферы.

Литература

- [1] L.A.Frank. J. Geophys. Res., 76, 5202, 1971.
 - [2] W.J.Heikkila. J.D.Winningham. J. Geophys. Res., 76, 883, 1971.
 - [3] T.Laaspere, R.A.Hoffman. COSPAR, Scattle, June, 1971.
 - [4] R.A.Hoffman. F.W.Berko. J. Geophys. Res., 76, 2967, 1971.
 - [5] В.В.Пустовалов, В.П.Силин. ЖЭТФ, 59, 2215, 1970; В.В.Пустовалов, В.П.Силин, В.Т.Тихончук. ЖЭТФ, 65, 1880, 1973; Н.Е.Андреев, В.В.Пустовалов, В.П.Силин, В.Т.Тихончук. Письма в ЖЭТФ, 18, 624, 1973.
 - [6] R.A.Gurnett. L.A.Frank. J.Geophys. Res., 77, 172, 1972.
 - [7] H.G.James. J. Geophys. Res., 78, 4578, 1973.
 - [8] Yu.V.Golikov, V.V.Pustovalov, A.B.Romanov, V.P.Silin, V.T.Tikhonchuk. Plan. Space Sci (to be published) 1975.
-