

## ВЫСЫПАНИЕ ПРОТОНОВ ИЗ МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИСКУССТВЕННОГО НИЗКОЧАСТОТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

*Р.А.Ковражкин, М.М.Могилевский, О.А.Молчанов,  
Ю.И.Гальперин, Н.В.Джорджио, Ж.М.Боске, А.Рем*

В работе приводятся результаты эксперимента по воздействию низкочастотным излучением на магнитосферную плазму. В результате такого воздействия происходит высыпание протонов. Дается предварительная интерпретация полученных данных.

В течение ряда лет различными группами исследователей как в нашей стране, так и за рубежом предпринимались попытки прямого обнаружения высыпаний частиц из магнитосферы Земли под действием низкочастотных волн, инжектированных наземными излучателями. Поскольку изменить функцию распределения электронов энергетически легче, чем для тяжелых ионов, то значительные усилия были направлены на обнаружение стимулированных высыпаний (СВ) электронов. Недавно такие высыпания были обнаружены<sup>1, 2</sup>. Однако в нашем эксперименте были обнаружены не только ожидавшиеся СВ электронов, но также и энергичных протонов. Этому посвящено данное сообщение.

Описание эксперимента и аппаратуры по анализу высыпаний электронов приведены в<sup>1</sup>. Наблюдение потоков высыпающихся протонов проводилось с помощью прибора СЭС-14, установленного на борту ИСЗ „Ореол-3”. Этот прибор измеряет потоки протонов в диапазоне энергий 66 – 216 кэВ, разделенном на четыре дифференциальных канала<sup>3</sup>.

На рис.1. приведены интенсивности протонов с энергиями  $91 \div 122$  кэВ (РД2) и  $159 \div 216$  кэВ (РД4) на восходящем витке на высотах  $1500 \div 2000$  км в послеполуночном секторе. Наблюдения проводились 22 декабря 1981 г. в спокойных геомагнитных условиях  $K_p = 0+$ . Для выделения СВ протонов над фоном флуктуаций их интенсивности измеряемые величины были сглажены методом скользящего среднего с интервалом осреднения 8 с. В нижней части рисунка приведено хронограмма работы излучателя (8 секунд посылка, 8 секунд пауза). На кривой РД2 рис.1 хорошо заметны периодические всплески интенсивности протонов, связанные с посылками излучателя. СВ протонов с энергией  $159 \div 216$  кэВ (РД4) менее заметны, чем для РД2, однако, например, начиная с 2.41.24UT отчетливо виден всплеск, коррелирующий с посылкой излучателя.

Обратим внимание на следующее.

- Область СВ энергичных протонов находится на  $L$ -оболочках  $3,2 \div 3,5$  и смещена к экватору от излучателя ( $L = 4$ );
- СВ энергичных протонов наблюдались в течение  $\sim 50$  с, т.е. размер области СВ по широте составляет 350 – 400 км, что сравнимо с диаметром области засветки ионосферы излучателем;
- всплески СВ энергичных протонов приходят к спутнику с задержкой 3 – 4 с относительно посылок излучателя. По-видимому, эти задержки объясняются временем распространения волны до области взаимодействия и временем пробега протонов от области взаимодействия до спутника.

Для сравнения СВ энергичных протонов и электронов на рис.2. приведены результаты наблюдений, проведенных 13 декабря 1981 г. при умеренной геомагнитной активности  $K_p = 3+$ . Смещение зоны СВ частиц к меньшим  $L$ -оболочкам и увеличение интенсивности высыпаний в данном случае (по сравнению с рис.1) связано, по-видимому, с известным эффектом качки протонами пояса кольцевого тока при магнитосферных суббурях. Можно констатировать, что характеристики области СВ сильно зависят от геомагнитной обстановки. Отметим несовпадение областей СВ для электронов с энергией 1,85 кэВ и для протонов с энер-

гией  $91 \div 122$  кэВ, хотя размеры этих областей и близки. Аналогичные явления СВ для протонов и электронов к экватору от излучателя регистрировались и на некоторых других витках, проходивших вблизи его меридиана.

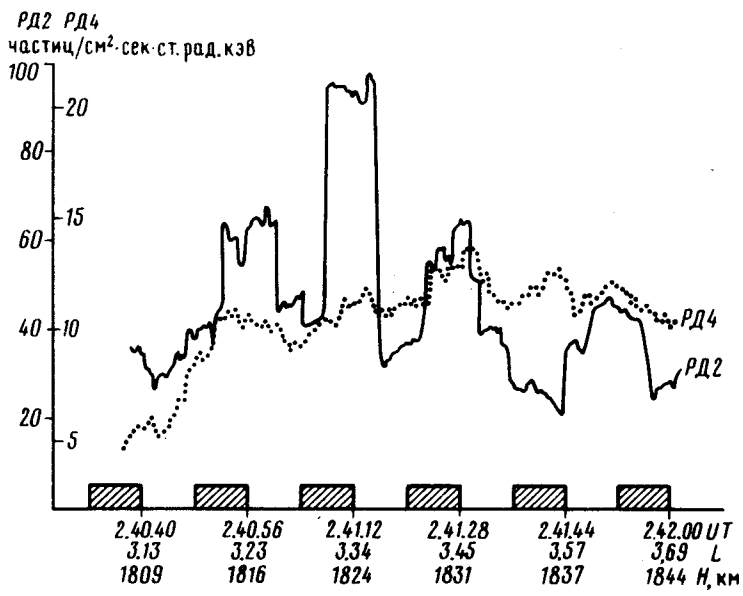


Рис.1. Интенсивности потоков протонов с энергиями  $91 \div 122$  кэВ (кривая РД2) и  $159 \div 216$  кэВ (кривая РД4), зарегистрированных 22 декабря 1981 г. на борту ИСЗ „Ореол-3” в спокойных геомагнитных условиях ( $K_p = 0+$ )

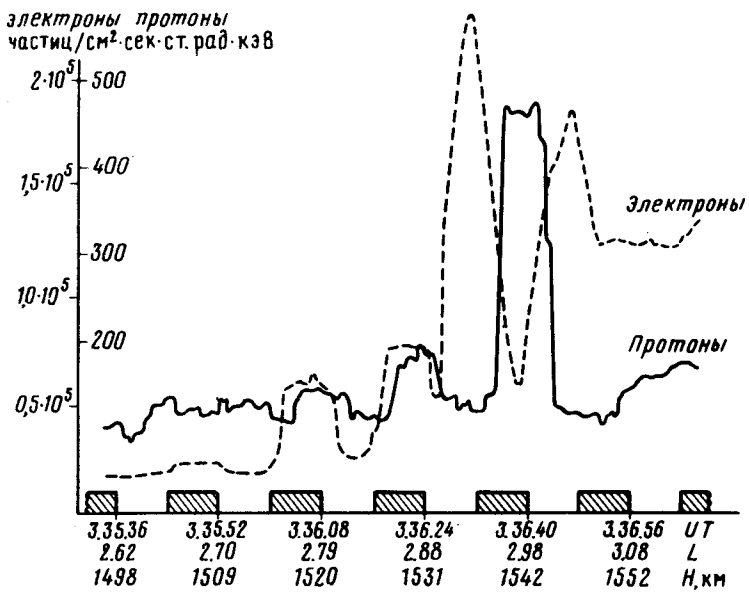


Рис.2. Интенсивности потоков протонов с энергиями  $91 \div 122$  кэВ (сплошная кривая) и потоков электронов со средней энергией 1,85 кэВ (пунктирная кривая), зарегистрированных 13 декабря 1981 г.

В теоретических работах, посвященных механизму взаимодействия мощных ОНЧ-волн с энергичными частицами в магнитосфере, как правило, рассматривалось только циклотронное взаимодействие волн с энергичными электронами и предполагалось продольное распространение волн ( $\psi = 0$ ,  $\psi$  – угол между волновым вектором  $k$  и направлением магнитного поля Земли) <sup>4, 5</sup>. Оценки с использованием этих предположений приводят к потокам вы-

сыпающихся частиц, существенно завышенным по сравнению с измеренными <sup>1, 2</sup> и не соответствуют современным представлениям о распространении ОНЧ волн в магнитосфере <sup>6</sup>, согласно которым волна непродольна ( $\psi \neq 0$ ).

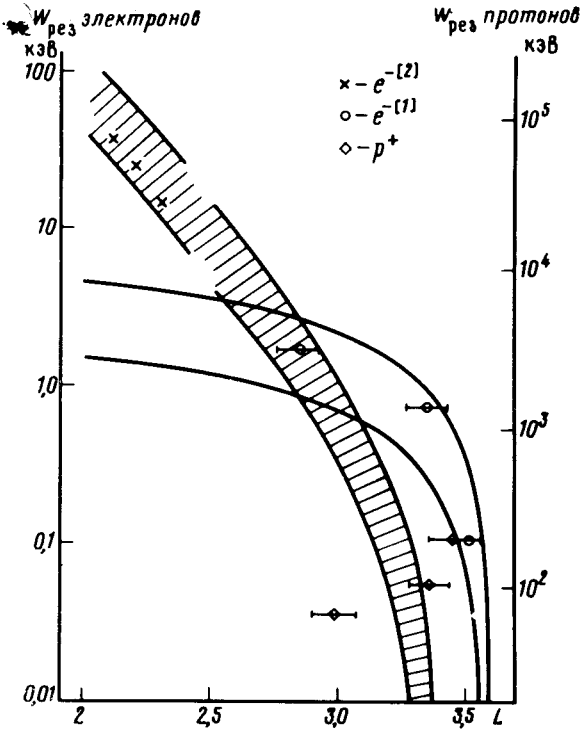


Рис.3. Сравнение теоретических и экспериментальных энергий частиц для циклотронного и черенковского механизмов взаимодействия

При  $\psi \neq 0$  кроме циклотронного взаимодействия с электронами ( $v_{\parallel, e} = (\omega_{Be} - \omega)/k_{\parallel}$ ,

где  $v_{\parallel, e}$  — продольная скорость электронов,  $\omega_{Be} = eH/me$  — гирочастота электронов,  $\omega$  — частота излучателя,  $k_{\parallel}$  — составляющая волнового вектора вдоль магнитного поля) необходимо учитывать также черенковское взаимодействие ОНЧ волны с электронами и протонами ( $v_{\parallel, e, i} = \omega/k_{\parallel}$ , где  $v_{\parallel, e, i}$  — продольные скорости электронов или протонов). Наиболее интенсивно такое взаимодействие, зависящее от угла  $\psi$  и также приводящее к питч-угловой диффузии частиц в конус потерь, происходит вблизи экваториальной плоскости магнитосферы.

На рис.3 приведены расчетные величины экваториальных резонансных энергий для черенковского (сплошные линии) и циклотронного взаимодействия (заштрихованная площадь) при непродольном распространении волны и различных моделях концентрации плазмы вместе с экспериментальными значениями L-параметра для максимума высыпания электронов ( $\circ$ ) и протонов ( $\diamond$ ) соответствующих энергий из кольцевого тока. Здесь же приведены данные относительно локализации области СВ для энергичных электронов из области внутреннего радиационного пояса в американском эксперименте с ОНЧ излучателями ( $\times$ ) согласно <sup>2</sup>. Видно, что в нашем эксперименте наблюдавшееся явление СВ энергичных частиц кольцевого тока ( $L \cong 2,5 \div 3,5$ ) связано в основном с черенковским резонансом. Величины высыпающихся потоков частиц в каждой силовой трубке рассчитываются путем интегрирования возмущенной функции распределения частиц внутри конуса потерь по длине и сечению области резонанса и удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. Детальные сравнения расчетных и измеренных потоков частиц при СВ будут приведены отдельно.

#### Литература

1. Ковражкин Р.А., Могилевский М.М., Боске Ж.М., Гальперин Ю.И., Джорджио Н.В., Лисаков Ю.В., Молчанов О.А., Рэм А. Письма в ЖЭТФ, 1983, 38, 332.

2. *Imhof W.L. et al. Geophys. Res. Let., 1983, 10, 361.*
3. *Galperin Yu.I. et al. Ann. de Geoph., 1982, 38, 583.*
4. *Inan U.S., Bell T.F. Helliwell R.A. J. Geophys. Res., 1978, 83, 3235.*
5. *Карпман В.И., Шкляр Д.Р. Геомагнетизм и аэрономия, 1976, 16, 573.*
6. *Молчанов О.А., Мальцева О.А. Геомагнетизм и аэрономия, 1982, 22, 95.*

Институт земного магнетизма,  
ионосферы и распространения  
радиоволн  
Академии наук СССР

Институт космических исследований  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
8 декабря 1983 г.