

УДК 551.510.535+550.385

ЭФФЕКТ РЕЗОНАНСНОГО ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ В МАГНИТОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЕ

В. В. Кречетов, О. А. Мальцева, О. А. Молчанов

Рассмотрен эффект резонансного обратного рассеяния сигнала (ОРС) субаврорального ОНЧ передатчика ($L \sim 4$) в магнитосфере. Описана экспериментальная установка и приведены полученные результаты. Обсуждаются основные статистические закономерности приема ОРС в зависимости от геомагнитной активности и местного времени. Обсуждается механизм ОРС, рассчитаны лучевые траектории, амплитудные характеристики, задержки ОРС и зоны резонансного поглощения ОНЧ сигнала.

В последние годы активно развивается метод изучения магнитосферы Земли с помощью наземных ОНЧ передатчиков. В таких экспериментах исследуются траектории и спектры волн, их взаимодействие с энергичными частицами, межволновое взаимодействие [1-4], а также проводится диагностика плазмы [5]. В нашей стране одним из первых экспериментов со среднеширотным ОНЧ передатчиком был эксперимент ИЗМИРАН и НИРФИ 1970 г. [6], где было обнаружено большое количество различных эффектов. Эксперименты по воздействию ОНЧ волн на субавроральную магнитосферу были поставлены ИЗМИРАН совместно с РГУ в рамках программы «МИНИ» в 1977—1980 гг. Перед нами стояла задача обнаружения и использование для диагностики обратно рассеянного сигнала (ОРС) наземного субаврорального ОНЧ передатчика. Первоначальные результаты были изложены в [5, 7, 8]. Ниже мы рассмотрим основные закономерности приема ОРС, полученные в этом эксперименте.

Описание эксперимента. Подробное изложение постановки эксперимента можно найти в [9]. Здесь мы кратко коснемся этого вопроса. В эксперименте использовался субавроральный ОНЧ передатчик ($L \sim 4$), работающий на частоте $f_0 = 19$ кГц, работа велась импульсами 0,5 с и периодом повторения 4 с. В отличие от других аналогичных экспериментов мы использовали достаточно высокую частоту излучения $\omega_0 > \omega_{Be, \min}$ ($\omega_{Be, \min}$ — минимальная электронная гирочастота вдоль траектории) и ориентировались на то, что в некоторой довольно узкой области силовой трубки, где $\omega_0 \approx \omega_{res}$ ($\omega_{res} \approx \omega_{Be} \cos \psi$ при $\omega_{Ne}^2 > \omega_{Be}^2$, ψ — угол между направлением магнитного поля и волновой нормалью), излучаемая волна будет сильно поглощаться, передавая свою энергию электронам. Механизм воздействия не сильно отличается от механизма турбулентного нагрева в лабораторной плазме [11]. В результате межволнового взаимодействия электронно-циклотронная турбулентность может трансформироваться в сторону низких частот [15], возбуждать ионно-звуковые и ионно-циклотронные колебания. Наконец, может возникнуть ОРС.

Однократно рассеянный сигнал имел величину ниже уровня шума, поэтому для его регистрации был собран приемный комплекс ОРС-1 [9], преобразующий временной интервал, между посылками в частотный с

дальнейшей амплитудно-частотной обработкой и накоплением. Недостатками комплекса ОРС-1 являлись ограниченный диапазон регистрируемых задержек и малая чувствительность из-за прохождения волноводного сигнала, а также необходимость большого времени для анализа данных в связи с невозможностью обработки в реальном времени. Эти недостатки были исключены в новой модификации комплекса ОРС-2, использовавшейся в эксперименте осенью 1980 г. Блок-схема ОРС-2 приведена на рис. 1. Сигнал с антенны (А) и приемника (П) попадал в блок ключевой авторегулировки [10], необходимой для уменьшения влияния атмосферных флюктуаций и дисперсии шума в полосе приема [11].

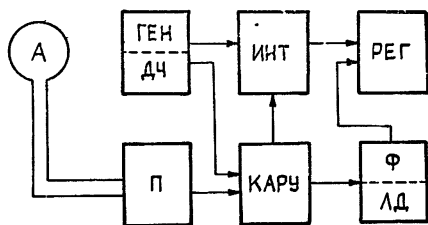


Рис. 1.

С блока кварцевого генератора и делителя частоты (ГЕН, ДЧ) на ключ КАРУ подавались импульсы с периодом 4 с и длительностью 0,8 с для вырезания волноводного сигнала, что предотвращало перегрузку и последствия в последующих каскадах. В начале каждого сеанса генератор синхронизовался с импульсами излучателя. Синхронный накопитель (ИНТ) [12] представлял собой систему из восьми интеграторов, которые поочередно через интервалы времени 0,4 с подключались на выход КАРУ в промежутке между импульсами излучения. Управление переключением интеграторов производилось блоком ГЕН/ДЧ. Результаты накопления считывались на ленту самописца (РЕГ). На другую дорожку этой же ленты для контроля могла подаваться огибающая первичного сигнала, прошедшая через блок фильтрации и линейного детектирования (Ф/ЛД). Накопление обычно производилось несколько минут. Пример записи синхронного накопления сигнала в середине интервала накопления показан на рис. 2. Виден подъем на третьем интеграторе, что соответствует моменту времени $0,8 \div 1,2$ с после окончания импульса передатчика.

Управление переключением интеграторов производилось блоком ГЕН/ДЧ. Результаты накопления считывались на ленту самописца (РЕГ). На другую дорожку этой же ленты для контроля могла подаваться огибающая первичного сигнала, прошедшая через блок фильтрации и линейного детектирования (Ф/ЛД). Накопление обычно производилось несколько минут. Пример записи синхронного накопления сигнала в середине интервала накопления показан на рис. 2. Виден подъем на третьем интеграторе, что соответствует моменту времени $0,8 \div 1,2$ с после окончания импульса передатчика.

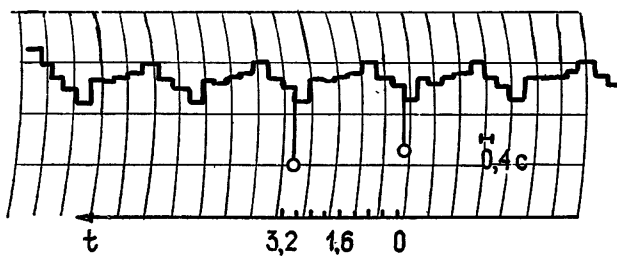


Рис. 2.

Результаты эксперимента 1980 г. Этот эксперимент в основном повторял предыдущий, однако в данном случае мы надеялись получить некоторые статистические характеристики ОРС, поскольку число сеансов было большим. Кроме того, как уже говорилось, в этом эксперименте использовался улучшенный вариант анализирующей аппаратуры.

В период с 10 сентября по 20 октября 1980 г. было проведено 38 сеансов наблюдений длительностью по 25 мин каждый с началом в местные времена 20^h30^m, 00^h00^m и 03^h00^m. В 29 сеансах (76%) наблюдался ОРС с достоверностью, большей, чем 95% [9]. Однако, как и в предыдущем эксперименте, уверенная регистрация ОРС фиксировалась

только в части сеанса, в большинстве случаев в конце его. Амплитуду ОРС было оценить довольно трудно, поэтому за меру интенсивности сигнала мы принимали количество превышений ОРС в сеансах уровня достоверности E_{Π} по отношению к возможному числу наблюдений ОРС. Эта вероятностная характеристика $W(E > E_{\Pi})$ обычно применяется для измерения таких, как в нашем случае, нерегулярных или слабых сигналов [12]. На рис. 3 приведена зависимость вероятности приема ОРС от местного времени и индекс геомагнитной активности. Видно, что вероятность приема возрастает в вечернее время и с увеличением геомагнитной активности, однако зависимость не слишком отчетлива, возможно, в связи с тем, что вероятность приема зависит от нескольких факторов: коэффициента прохождения через ионосферу, коэффициента рассеяния, условий распространения в магнитосфере, в общем случае по-разному коррелирующих с LT и K_p .

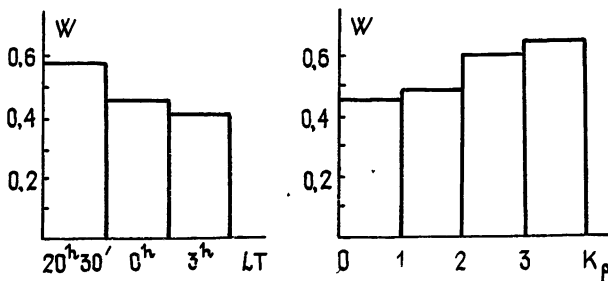


Рис. 3.

Более представительными являются характеристики задержек ОРС. На рис. 4 приведены величины средних задержек в сеансе в зависимости от K_p (светлые кружки — $20^h 30^m$, треугольники — 00^h , темные — 03^h). Очевидна связь τ с K_p как для вечерних, так и для утренних сеансов. Мы попытались также количественно проанализировать тенденцию к изменению задержек в зависимости от времени воздействия, отмеченную еще в предыдущем эксперименте. При этом для получения более точных значений τ мы применяли линейную экстраполяцию первичных

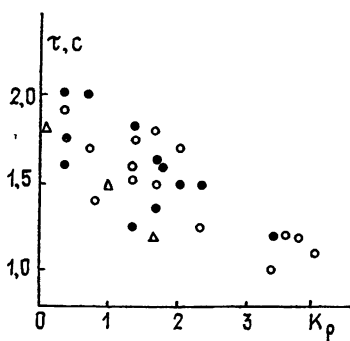


Рис. 4.

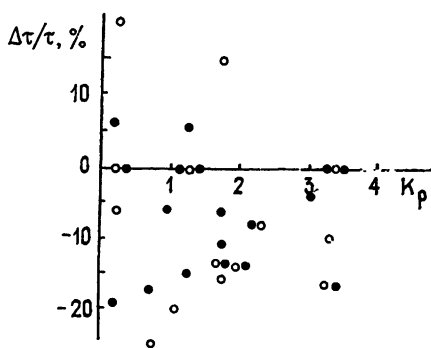


Рис. 5.

данных (см. рис. 2). На рис. 5 показано относительное изменение задержек в середине (светлые кружки) и конце (темные кружки) сеанса по отношению к задержкам в первой половине сеанса. Видно, что в большинстве случаев (65%) задержки уменьшаются, в 25% — неизменны и только в $\sim 10\%$ случаев увеличиваются на $5 \div 15\%$.

В десяти сеансах мы попытались исследовать частотные характеристики ОРС. Было обнаружено, что сигнал наблюдался при отстройке по частоте на -100 Гц и не наблюдался при отстройках частоты приема на -200 и $+100$ Гц. К сожалению, по техническим причинам, в этом эксперименте нам не удалось получить амплитудно-частотную характеристику ОРС. Наконец, в нескольких сеансах мы меняли частоту излучателя с 19 на 28 кГц. При этом, как и следовало ожидать, величины задержек уменьшались примерно на 30% .

Таким образом, экспериментально установлены следующие особенности эффекта резонансного обратного рассеяния:

а) Уменьшение задержек ОРС с увеличением геомагнитной активности.

б) Тенденция к увеличению вероятности приема ОРС в вечернее время и периоды повышенной геомагнитной активности.

в) Повышение интенсивности рассеяния с увеличением времени воздействия.

г) Преимущественное уменьшение задержек на $10\div 20\%$ за времена воздействия $10\div 20$ мин.

д) Спектр ОРС, по-видимому, смещен в сторону низких частот на $\Delta\omega \simeq 50\div 100$ Гц. Задержки ОРС уменьшаются при увеличении частоты излучателя.

Обсуждение результатов. Примерная схема обратного рассеяния выглядит следующим образом. ОНЧ волна, достигая области резонанса ($\omega_0 \simeq \omega_{ve} \cos \psi$), эффективно взаимодействует с электронной компонентой, отдавая ей свою энергию. Характерное время передачи энергии $\sim 10^2$ с. Нагретая электронная компонента, диффундируя вдоль силовой трубки, увеличивает уровень ионно-звуковой турбулентности. Характерная скорость диффузии порядка тепловой скорости ионов. На границе области сильного поглощения прямая ОНЧ волна эффективно взаимодействует с ионно-звуковой турбулентностью, что приводит к появлению обратной волны. Вследствие нелинейного взаимодействия происходит избирательное усиление ионно-звуковых волн в некоторой области волновых чисел, что приводит к еще большему усилению обратной волны. К увеличению нелинейного инкремента приводит увеличение плотности энергии падающей волны в области взаимодействия.

Мы провели модельные расчеты характеристик распространения согласно методике, изложенной в [13], для $f_0 = 19$ кГц и условий ночи и равновесия.

На рис. 6 и 7 представлены некоторые результаты расчетов для средних значений $K\rho = 3\div 4$. Характеристики ОНЧ волны представлены в зависимости от кошироты траектории Θ , так что, например, по функции $L(\Theta)$ легко понять вид и форму траектории и других величин вдоль нее. Остановимся более подробно на первой иллюстрации. На рис. 6а показаны зависимости $L(\Theta)$ и $\Psi(\Theta)$. Траектория волны из-за градиентов электронной концентрации сначала отклоняется в сторону больших значений L , а затем возвращается примерно на исходную силовую линию благодаря градиентной магнитной рефракции. Это стандартный ход $L(\Theta)$ для субавроральных условий. Из рис. 6б и 6в видно, что волна испытывает дефокусировку (коэффициент дефокусировки k_d уменьшается), однако в районе $\Theta = 50\div 55^\circ$ (высоты $\sim (10\div 12) \cdot 10^3$ км) ОНЧ волна переходит в квазирезонансный мод распространения с увеличением $k_{пЕ}$ ($k_{пЕ}$ — коэффициент переполаризации), поэтому вплоть до области поглощения величина амплитуды электрического поля A изменяется незначительно, в отличие от амплитуды магнитной компоненты B . Резкое уменьшение A и B в области $\Theta \gtrsim 70^\circ$ связано с включением фактора бесстолкновительного затухания ОНЧ волны. На рис. 6г построена величина ξ , характеризующая поглощение энергии волн.

Область максимума $|\xi|$ как раз соответствует области нагрева с толщиной $L_h \approx 1 \div 2 \cdot 10^3$ км ($\Delta\Theta = 2 \div 3^\circ$). Аналогичная картина наблюдается для $Kp = 3$. на рис. 7. Различие только в изменении положения области нагрева относительно координат L , Θ . Заметим, однако, что в обоих случаях высота области практически одинакова и равняется $\sim 16,5 \cdot 10^3$ км. На рис. 7г показан ход удвоенной величины групповой задержки $\tau = 2\tau_d$ для иллюстрируемых условий с $Kp = 3$, $Kp = 4$. Вблизи области поглощения задержки быстро нарастают (эти области выделены прямоугольником). Ниже эта особенность будет обсуждаться более подробно. Можно предполагать, что вследствие симметрии процесса обратного рассеяния величина τ , соответствующая области поглощения, близка к экспериментально наблюдаемым задержкам ОРС.

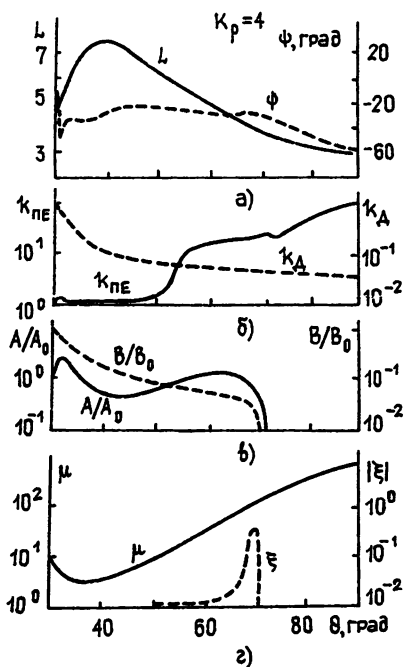


Рис. 6.

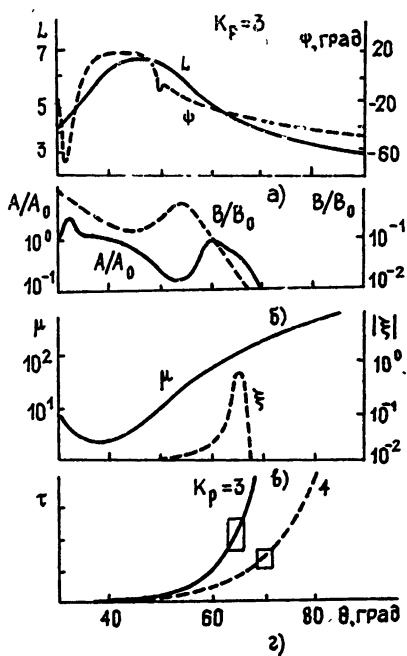


Рис. 7.

На рис. 8 приведен график расчетных значений τ в зависимости от Kp . Сравнение графиков 8 и 4 показывает неплохое совпадение теоретических расчетов и экспериментальных данных. Заметим, что детального совпадения трудно было бы ожидать, поскольку модели распределения тепловой и особенно энергичной плазмы вряд ли описывают реальные условия, хотя, по-видимому, и близки к ним.

Попробуем теперь дать интерпретацию основных особенностей ОРС.

а) Большая вероятность наблюдения ОРС и сам факт его уверенного обнаружения указывает на наличие эффективного механизма рассеяния в фиксированной области магнитосферы. Таким механизмом может быть рассеяние на ионно-звуковых волнах (ИЗВ) в районе области нагрева ОНЧ волны.

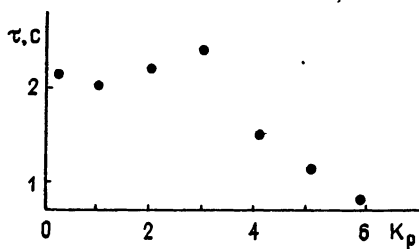


Рис. 8.

б) Сдвиг частоты ОРС в сторону низких частот объясняется свойством механизма распадного процесса. При этом $\Delta\omega \approx kv_{Ti} \approx (\omega/c)v_{Ti}\mu$, что при $v_{Ti}=1 \div 10$ км/с и $\mu \sim 1 \div 2 \cdot 10^2$ приводит к значениям $\Delta\omega = -20 \div 200$ Гц. Это неплохо согласуется с экспериментом.

в) Повышение вероятности наблюдения с увеличением Kp и с возрастанием времени воздействия связано с увеличением начального уровня ИЗВ в квазिवозмущенное время и возможностью накопления фона ИЗВ в течение воздействия.

г) Уменьшение задержек ОРС со временем воздействия связано, по-видимому, с расширением нагревной области. Скорость такого расширения v можно оценить из элементарных соображений:

$$v = h \Delta\tau / \tau, \quad (1)$$

где $\Delta\tau$ — изменение задержки τ за время воздействия T и h — высота области отражения. При $T \sim 10$ мин ($6 \cdot 10^2$ с) $h = 16,5 \cdot 10^3$ км и $\Delta\tau / \tau \approx 0,1 \div 0,2$ получаем $v \sim 3 \div 6$ км/с, что весьма близко к v_{Ti} — скорости продольной диффузии нагревной области или скорости ИЗВ турбулентности.

д) Наконец, уменьшение задержек с Kp , как уже было показано, вполне соответствует нашим расчетам по схеме рассеяния от турбулентной области и связано, вероятно, с уменьшением концентрации N_e с увеличением геомагнитной активности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Helliwell R. A. Stanford, California, Univ. Press, 1965, 6, № 3, p. 12.
2. Dowden R. L. Space Res., Akademie-Verlag, Berlin, 1976, 16, S. 613.
3. Молчанов О. А. — Изв. вузов — Радиофизика, 1977, 20, № 12, с. 1763.
4. Kimura I. Planet Space Sci., 1967, 15, № 9, p. 1427.
5. Молчанов О. А., Кречетов В. В., Мальцева О. А. — Изв. вузов — Радиофизика, 1981, 24, № 9, с. 1062.
6. Рапопорт В. О., Трахтенгерц В. Ю., Череповицкий В. А. — Изв. вузов — Радиофизика, 1976, 19, № 12, с. 1904.
7. Молчанов О. А., Могилевский М. М., Мальцева О. А., Кречетов В. В. В кн.: Исследование процессов в авроральной магнитосфере методами активного воздействия. — Апатиты: ПГИ КФ АН СССР, 1978, с. 106.
8. Молчанов О. А., Кречетов В. В., Мальцева О. А. Тезисы симпозиума КАИП по солнечно-земной физике. — Ашхабад: 1978, с. 64.
9. Кречетов В. В., Щекотов А. Ю. В кн.: Низкочастотные излучения в магнитосфере Земли. — Апатиты: ПГИ КФ АН СССР, 1981, с. 77.
10. Щекотов А. Ю. Приборы и техника эксперимента, 1976, № 5, с. 149.
11. Бернштейн С. Л. — ТИИЭР, 1974, 62, № 3, с. 13.
12. Поиск, обнаружение и измерение параметров сигналов в радионавигационных системах. / Под ред. Ю. М. Казаринова. — М.: Сов. радио, 1975, с. 286.
13. Мальцева О. А., Молчанов О. А., Резников А. Е. В кн.: Низкочастотные волны и сигналы в магнитосфере Земли. — М.: Наука, 1980, с. 105.
14. Иванов А. А. В кн.: Вопросы теории плазмы. — М.: Атомиздат, 1972, вып. 6, с. 139.
15. Цытович В. Н. Нелинейные эффекты в плазме. — М.: Наука, 1967, с. 287.

Институт земного магнетизма,
ионосферы и распространения
радиоволн АН СССР

Поступила в редакцию
15 декабря 1981 г.

AN EFFECT OF THE RESONANCE BACK SCATTERING IN THE MAGNETOSPHERIC PLASMA

V. V. Kretchetov, O. A. Mal'tseva, O. A. Molchanov

An effect of the resonance back scattering of the signal (BSS) of a subauroral VLF transmitter ($L \sim 4$) in the magnetosphere is considered. The experimental set is described and the results obtained are presented. The basic statistical regularities of BSS reception are discussed depending on the geomagnetic activity and the local time. The mechanism of BSS is discussed, ray trajectories, amplitude characteristics, BSS delays and zones of resonance absorption of VLF signal have been calculated.