

Министерство высшего и среднего специального образования РСФСР

Горьковский ордена Трудового Красного Знамени
научно-исследовательский радиопизический институт (НИРФИ)

П р е п р и н т № 230

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЗОНАНСНОЙ СТРУКТУРЫ СПЕКТРА
АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ШУМОВОГО ФОНА
В ДИАПАЗОНЕ КОРОТКОПЕРИОДНЫХ ГЕОМАГНИТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ

П.П.Беляев
С.В.Поляков
В.О.Рапопорт
В.Ю.Трахтенгерц

Горький 1987

Беляев П.П., Поляков С.В., Рапопорт В.О., Трахтенгерц В.Ю.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЗОНАНСНОЙ СТРУКТУРЫ СПЕКТРА АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ШУМОВОГО ФОНА В ДИАПАЗОНЕ КОРОТКО-ПЕРИОДНЫХ ГЕОМАГНИТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ. Горький, Препринт № 230/НИРЭИ, 1987. - 33 с.

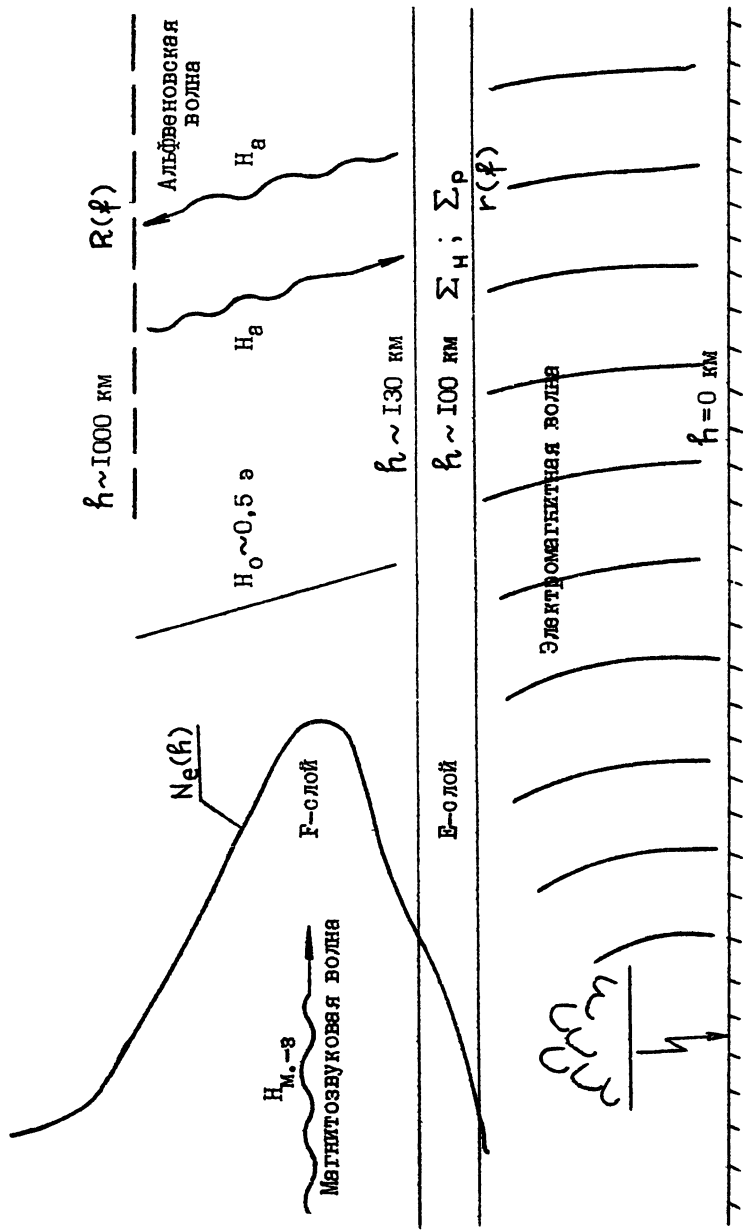
УДК 550.388.3

В работе изложены результаты экспериментальных исследований структуры спектра регулярного шумового фона тангенциальных компонент магнитного поля в диапазоне (0,1 - 10) Гц. Обнаружена и детально исследована регулярно наблюдаемая резонансная структура усредненных спектров, которая проявляется в чередовании максимумов и минимумов с частотным интервалом $\Delta F \approx (0,5-2,8)$ Гц. Величина ΔF имеет характерный суточный ход и коррелирует с суточным ходом критической частоты слоя F в пункте наблюдения. Глубина модуляции спектра достигает 50%. Исследован суточный, сезонный ход, зависимость параметров резонансной структуры от солнечной активности. Показано, что обсуждаемый регулярный шумовой фон имеет грозовую природу. Полученные результаты естественным образом объясняются влиянием ионосферного альфвеновского резонатора.

В в е д е н и е

Диапазон короткопериодных геомагнитных пульсаций (КПК, $\Delta F \approx 0,1-10$ Гц) привлекает внимание исследователей в первую очередь потому, что динамика многих процессов в магнитосфере Земли определяется взаимодействием энергичных частиц с волнами этого диапазона. Интерес к исследованиям КПК особенно возрос с начала 60-х годов, когда выяснилось, что в этом диапазоне существуют глобальные электромагнитные резонаторы. Наиболее подробно изучен глобальный электромагнитный резонанс полости земля-ионосфера (шумановский резонанс) /1, 2/. Систематическое изложение современного состояния исследований шумановских резонансов содержится в монографии /3/. Другим примером проявления резонансных свойств околоземной плазмы в диапазоне КПК является существование волновода для быстрых магнитозвуковых волн на ионосферных высотах /4, 6/, обусловленного немонотонным профилем альфвеновского показателя преломления в ионосфере (рис. 1). Хотя добротность этого волновода не велика, тем не менее он играет важную роль в формировании зоны приема КПК от локального (магнитосферного) источника.

В /7/ 1976 году одним из авторов данной работы было высказано предположение о том, что в диапазоне $0,5-10$ Гц на высотах ионосферы должен существовать еще один естественный резонатор для альфвеновских волн /8/. Следует заметить, что существование такого резонатора далеко не очевидно, поскольку в силу специфической дисперсии альфвеновских волн ($\omega = K_z V_a$, ω - частота, проекция волнового вектора на направление магнитного поля) существующий на высотах слоя F2 (рис. 1) немонотонный профиль показателя преломления n_a еще не обеспечивает возможности полного внутреннего отражения волн, и требуется обязательное нарушение при-



Р и с. 1. Схема формирования магнитозвукового волновода в F-слое (слева сверху), ионосферного альфвеновского резонатора (ИАР, справа сверху) и волновода (резонатора) Земля — ионосфера

ближения геометрической оптики. Как показывают расчеты /7, 8/, это условие в диапазоне $0,1 - 10$ Гц может быть выполнено выше и ниже максимума F-слоя. Те же особенности дисперсии альфвеновских волн приводят еще к одному важному следствию - отсутствию компоненты групповой скорости поперек силовых линий магнитного поля. Это означает, что при наличии отражений выше и ниже максимума F-слоя формируется локальный в поперечном относительно магнитного поля направлении резонатор для альфвеновских волн, свойства которого определяются лишь характеристиками среды вдоль выбранной магнитной силовой линии.

Проведенные в последнее время исследования продемонстрировали важную роль ионосферного альфвеновского резонанса (ИАР) в ряде геофизических явлений. Так в работах /9, 10/ теоретически показано, что ИАР может оказывать существенное влияние на формирование спектров КПК в магнитосферном альфвеновском мазере. Значительное место отводится ИАР в объяснении ряда авроральных явлений /11, 12/.

В связи с выше сказанным появилась насущная необходимость в экспериментальном обнаружении ИАР, что и является целью настоящей работы. В качестве основы такого независимого от магнитосферных явлений эксперимента по обнаружению ИАР можно использовать то обстоятельство, что нижняя стенка ИАР одновременно служит верхней стенкой полости Земля-ионосфера, и, следовательно, оказывает влияние на формирование частотной характеристики ее импеданса в соответствующем диапазоне частот. Остается найти источник электромагнитного поля в полости Земля-ионосфера с известной амплитудно-частотной характеристикой. Как показано в данной работе, в качестве такого источника могут быть выбраны мировые и локальные очаги гроз.

I. Техника и методика измерений

Стандартная техника, предназначенная для геофизических исследований в диапазоне $\Delta F \approx 0,1 - 10$ Гц, оказалась непригодной для анализа тонкой структуры спектра атмосферного шумового фона, создаваемого грозowymi источниками. В НИРФИ была разработана высокочувствительная приемная аппаратура, включающая индукционные

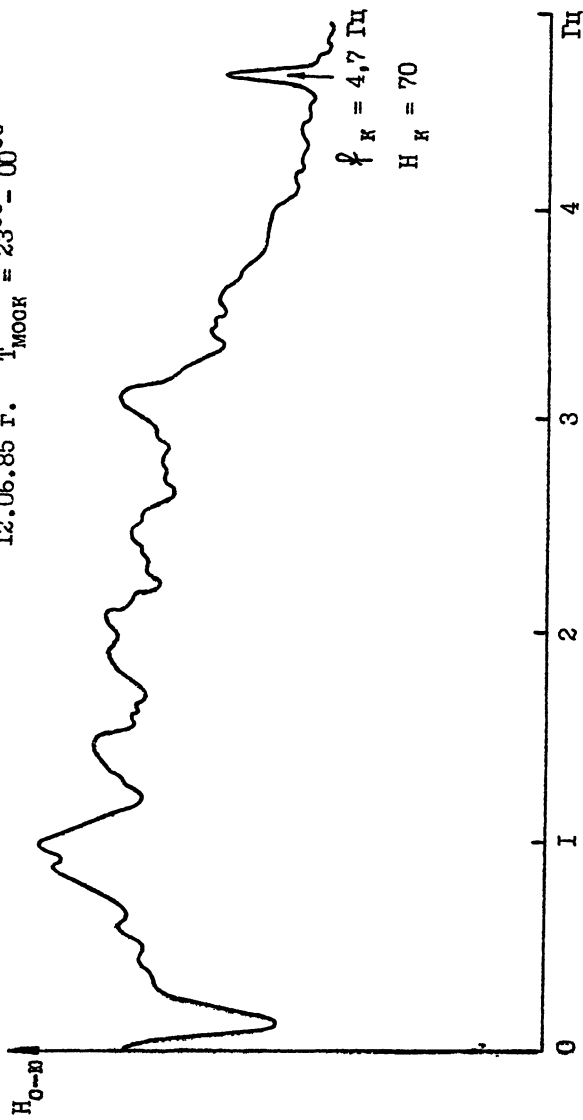
датчики полного вектора H магнитного поля и малошумящие предварительные усилители. Уровень собственных шумов в горизонтальной компоненте ($H_{с-ю}$, $H_{в-з}$) $\sim 5 \cdot 10^{-5} \gamma / \text{Гц}$, вертикальной компоненте — H_z : $5 \cdot 10^{-5} \gamma / \text{Гц}$. Отличие в чувствительностях антенн $H_{с-ю}$ и H_z связано с различным конструктивным исполнением. Антенны $H_{с-ю}$ выполнены в виде катушек (количество витков $N \approx 350000$) с пермалоевым сердечником $\mu_{\text{эфф}} = 5000$. Антенна H_z выполнена в виде воздушной рамки ($N = 18$, $S \approx 4 \cdot 10^4 \text{ м}^2$). Приемный пункт располагался вблизи г. Горького, $L \approx 2,65$. Ориентация антенн $H_{с-ю}$, $H_{в-з}$ определялась по компасу без учета поправок на магнитное склонение.

Обработка шума велась на анализаторе спектра СКЧ-72/2 (200 частотных каналов на выбранную полосу частот) и заключалась в усреднении независимых последовательных спектральных реализаций. Обычно использовались полосы анализа (0,025–5) и (0,1–20) Гц. Регистрация усредненных спектров проводилась на двухкоординатном самописце с непрерывной лентопротяжкой.

2. Обнаружение резонансной структуры спектра (РСС)

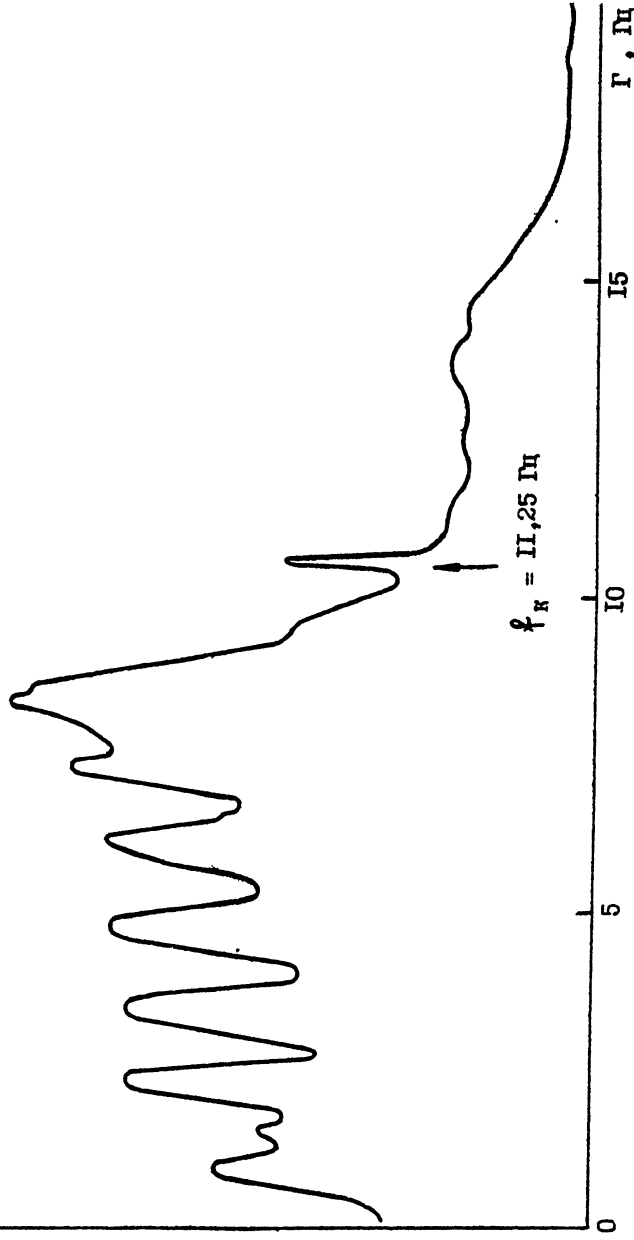
Первые регистрации резонансной структуры были получены в июне 1985 года в околополуденное время с усреднением по 100 независимым спектральным реализациям. Пример первой регистрации приведен на рис. 2а, где можно видеть относительно слабо выраженную резонансную структуру с частотным интервалом между максимумами (минимумами) $\Delta F \approx 0,5$ Гц. На рис. 2б приведен типичный пример регистрации в полосе $\Delta F = 0-20$ Гц, полученные в более поздних экспериментах. Максимумы спектра на частотах $F \approx 8$, 14 Гц соответствуют первому и второму шумановским резонансам. Узкая спектральная линия между шумановскими резонансами — частотная калибровка ($f_k \approx 11,25$ Гц). Нулевой уровень вблизи верхнего края диапазона обусловлен высокочастотной фильтрацией входного сигнала. Обсуждаемая резонансная структура спектра сосредоточена в области частот $\Delta F \approx 10$ Гц (см. рис. 1б). По характеру спектра резонансная структура очень похожа на спорадические излучения типа "гидромагнитные шипения" /13/. Согласно /13/, этот тип излучений на геомагнитных обсерваториях наблюдается очень редко и связывается с ге-

12.06.85 г. $T_{\text{моок}} = 23^{\circ 00} - 00^{\circ 00}$



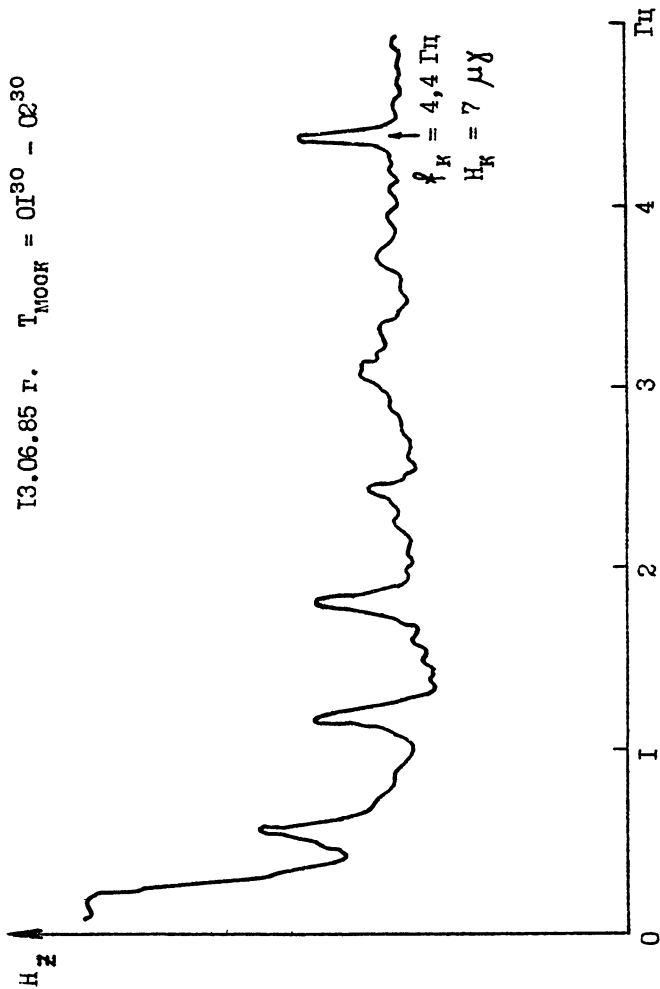
Р и с. 2а. Пример первой регистрации резонансной структуры спектра (РСС). Полова анализа $\Delta F = 5$ Гц, число частотных каналов $N = 200$, полоса канала $\Delta f \approx 0,025$ Гц, усреднение по ~ 100 независимым спектральным реализациям. Характерный частотный масштаб резонансной структуры $\Delta F \approx 0,5$ Гц (5 максимумов в районе частот $0,5 - 3,5$ Гц). На частоте $f_k = 4,7$ Гц включено внешнее калибровочное магнитное поле с амплитудой $H_k = 70 \mu\text{Г}$ ($70 \cdot 10^{-9}$ а/м). Северо-южная компонента магнитного поля. Амплитудно-частотные характеристики приемных трактов $H_{0-н}$ и $H_{в-з}$ по внешнему калибровочному полю $H_k (f)$ см. на рис. 3а.

Н В-3

2. 08.86 Г. $T_{\text{моск}} = 1^{\circ}30' - 1^{\circ}45'$ 

Р и с. 26. Пример регистрации РСС в полосе анализа $\Delta F = 20$ Гц (усреднение по 120 спектральным реализациям, разрешение по частоте $\Delta f = 0,1$ Гц), выполненной на усовершенствованном мультиметре (сеймостабилизация, экранирование). Подъем амплитуды шума в районе частот ~ 8 и 14 Гц соответствует первому и второму шумовым резонансам полости Земли - ионосфера. Компонента поля восток - запад.

13.06.85 г. $T_{\text{моок}} = 01^{\circ}30' - 02^{\circ}30'$

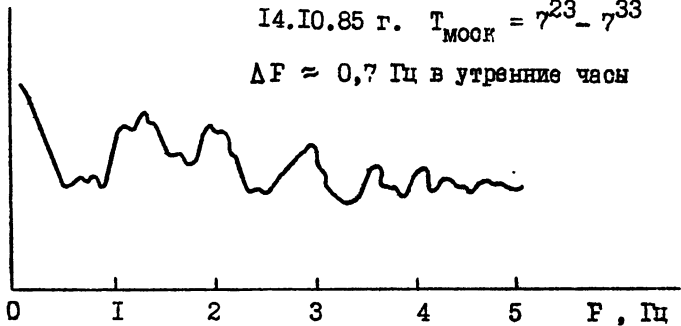


Р и с. 2в. Пример структуры спектра в вертикальной компоненте магнитного поля H_z (ср. с рис. 2а) с рядом узкополосных максимумов. Калибровка амплитуды на частоте $f_K = 4,4 \text{ Гц}$, $H_K = 7 \text{ мк}$ ($7 \cdot 10^{-9} \text{ в/м}$). Полоса анализа $\Delta F = 5 \text{ Гц}$, разделение по частоте $\Delta f = 0,025 \text{ Гц}$, усреднение по ~ 100 спектральным реализациям.

H_{B-3}

14.10.85 г. $T_{\text{моск}} = 7^{23} - 7^{33}$

$\Delta F \approx 0,7$ Гц в утренние часы



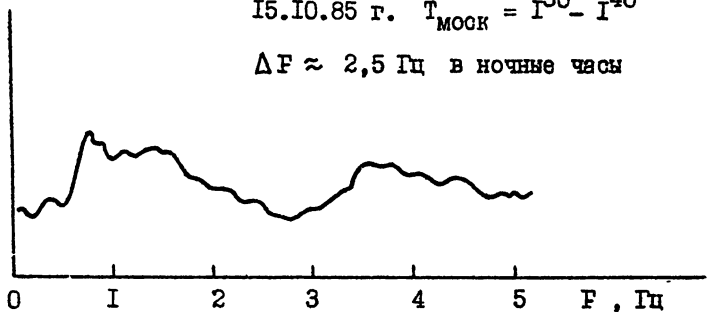
Малая "контрастность" структуры объясняется быстрым дрейфом масштаба РСС ΔF в утренние часы за интервал времени интегрирования спектра

г)

H_{C-8}

15.10.85 г. $T_{\text{моск}} = 1^{30} - 1^{40}$

$\Delta F \approx 2,5$ Гц в ночные часы



д)

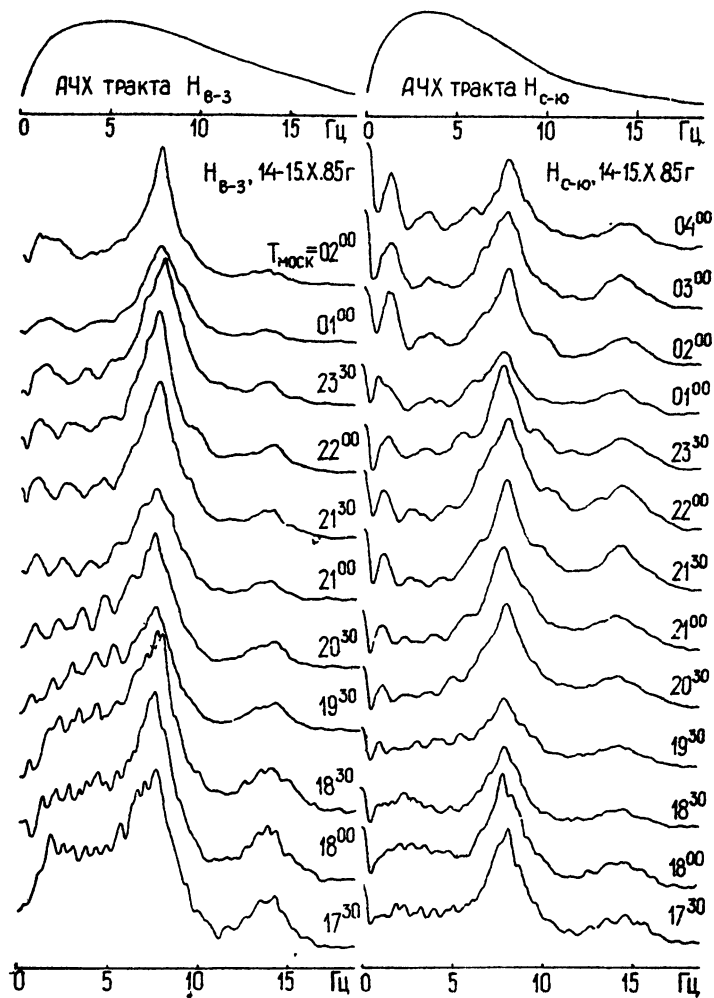
Р и с. 2. Примеры регистрации РСС, иллюстрирующие соотношение частотных масштабов ΔF в различное время суток

нерацией альфвеновских волн в магнитосфере в процессе развития циклотронной неустойчивости. Результаты эпизодических наблюдений структуры спектра, подобной рис. 2, приводятся также в работах /3, I4-I6/. В отличие от цитируемых работ мы утверждаем, что резонансная структура спектра, подобная рис. 2, является наряду с шумановскими резонансами регулярно наблюдаемой фундаментальной характеристикой шума в диапазоне КПК.

Сказанное относится к спектрам горизонтальных компонент магнитного поля H_{τ} . В компоненте H_z структуры спектра, подобной H_{τ} , достаточно отчетливо не наблюдалось, если не считать первых регистраций усредненных спектров, полученных летом 1985 года, когда в компоненте H_z были зарегистрированы случаи очень специфической резонансной структуры спектра, содержащей ряд узких максимумов. Пример подобной регистрации приведен на рис. 2в. Для более определенных выводов относительно H_z необходимы дальнейшие морфологические исследования.

3. Суточный ход параметров РСС

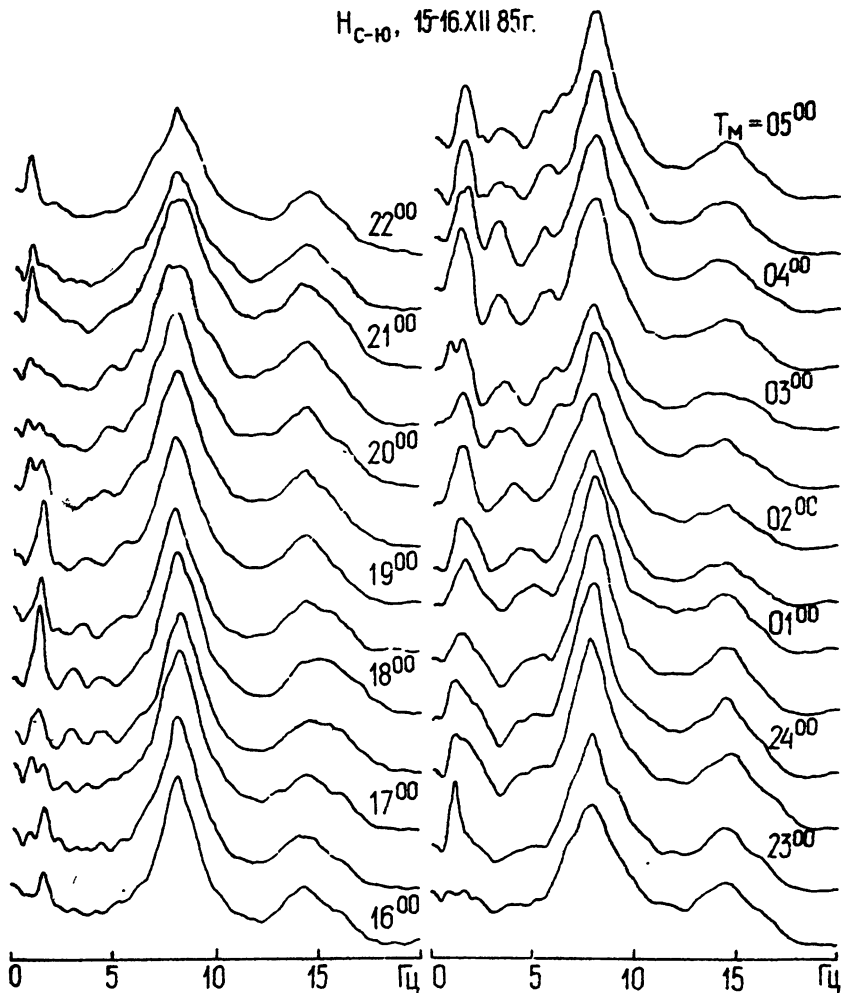
В течение 1985-1987 годов было проведено 36 суточных прогонов (6 прогонов в октябре, 10 в декабре 1985 г., 2 в феврале, 6 в марте-апреле, 3 в июле и 3 в сентябре 1986 г., 6 в январе 1987 года) по регистрации усредненных спектров в полосе частот 20 Гц (разрешение по частоте 0,1 Гц). Время получения каждого усредненного спектра ~ 15 мин. (усреднение по 128 спектральным реализациям). Типичные примеры суточных прогонов или их фрагменты приведены на рис. 3а - 3к. Во всех прогонах в области частот $\Delta F \approx (1 - 10)$ Гц четко наблюдается резонансная структура с частотным интервалом между резонансными частотами в пределах $\Delta F \approx 0,5 - 2,8$ Гц. Величина ΔF имеет характерный суточный ход: ΔF максимально в ночные часы и относительно быстро уменьшается утром и вечером (см. рис. 4). Глубина модуляции спектра максимальна ночью (до 50%) и резко уменьшается в утренние и вечерние часы. В дневное время РСС наблюдается очень редко. В ночные часы обсуждаемая структура накладывается на первый максимум шумановского резонанса и приводит к его "расщеплению", что повидимому, наблюдалось ранее /3/. На рис. 4а,б приведены зависимости



Р и с. За. Пример ночного профиля усредненных спектров шума в полосе частот $\Delta F = 20$ Гц для компонент магнитного поля $H_{C-ю}$, H_{B-3} . Усреднение по 128 независимым спектральным реализациям. Вверху приведены амплитудно-частотные характеристики приемных трактов, снятые с использованием внешней калибровочной рамки в качестве источника калибровочного поля.

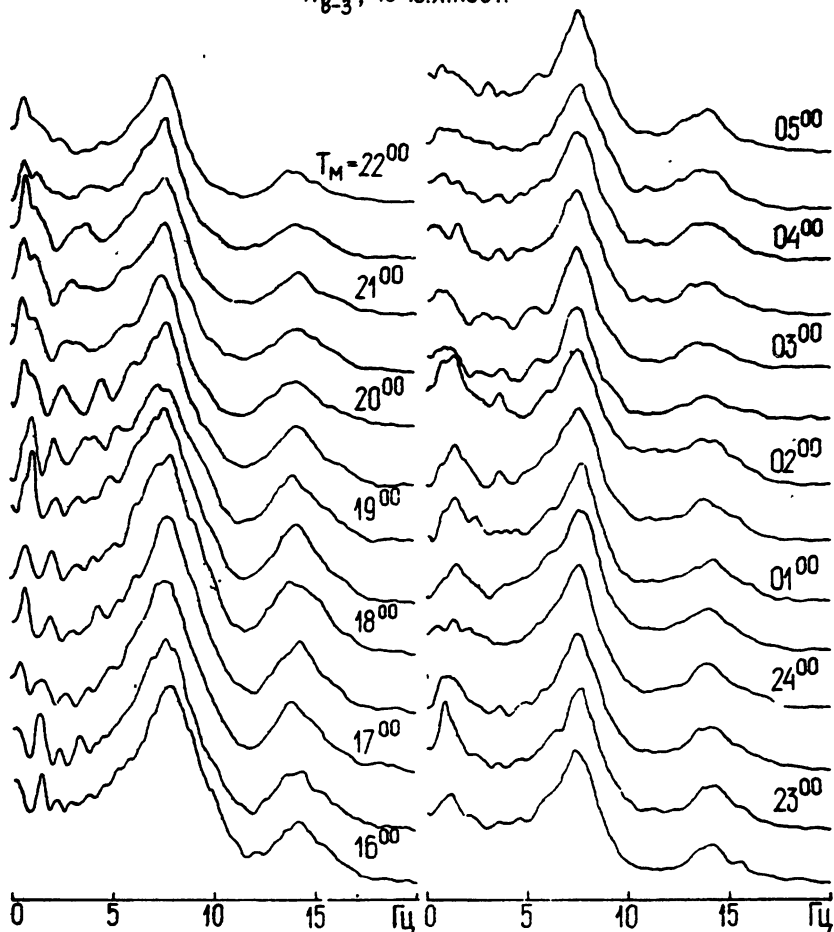
Декабрь 1985 г.

H_c-ю, 15-16.XII 85г.

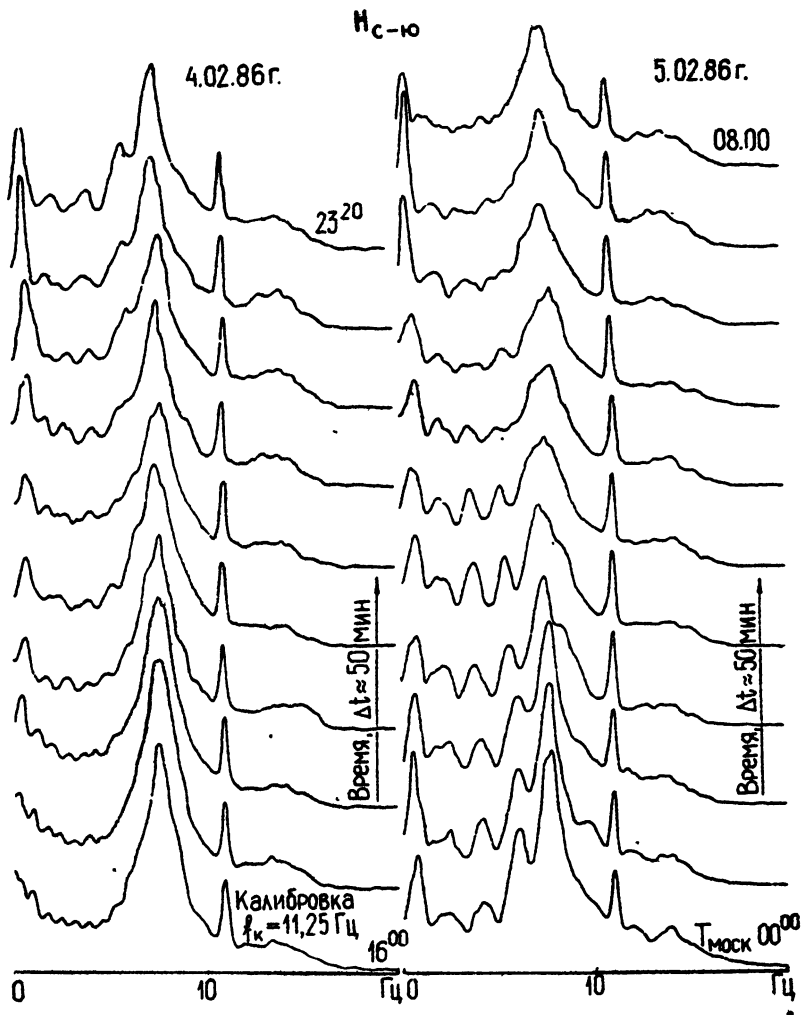


Р и с. 36. Пример регистрации резонансной структуры спектра. В отличие от рис. 3а РСС выражена более слабо. Вывод амплитуды спектра на рис.3б в логарифмическом масштабе. Декабрь 1985 г.

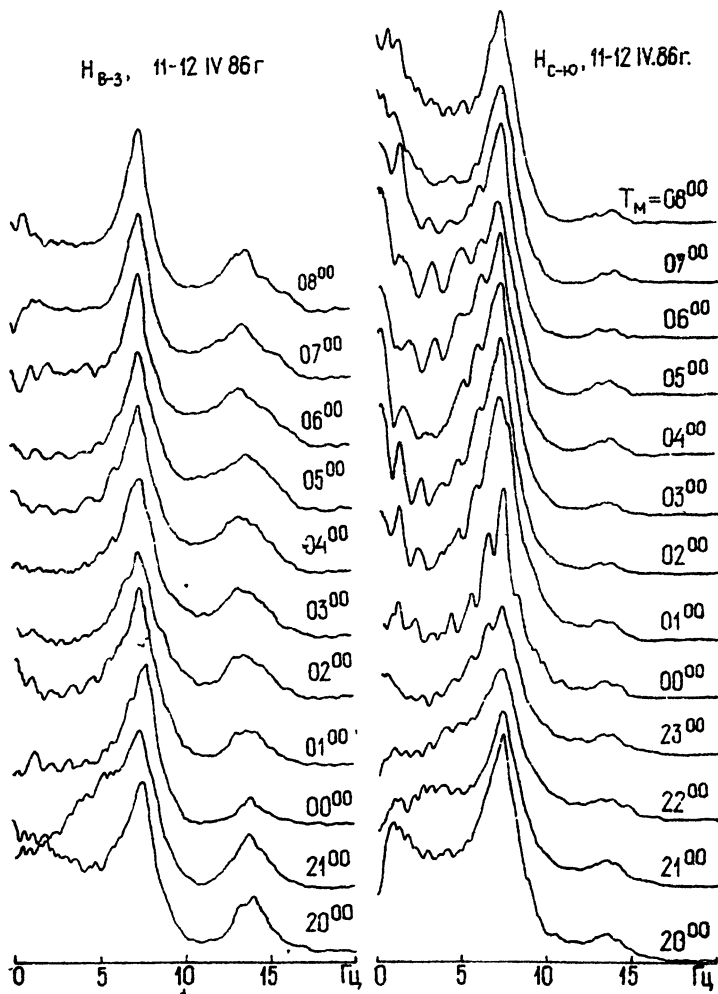
H₈₋₃, 15-16.XII.86 г.



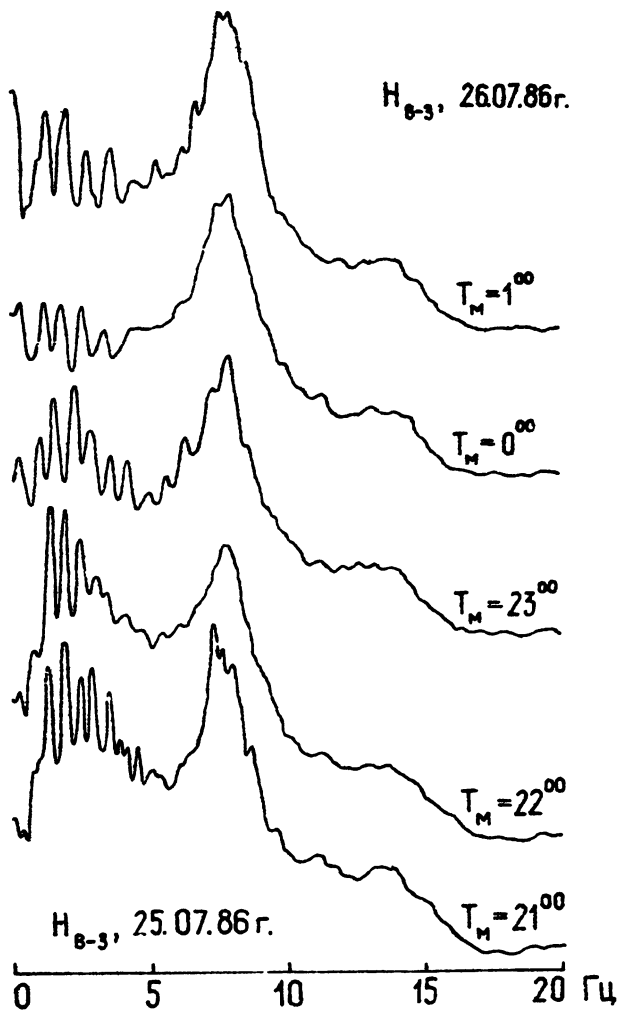
Р и с. Зв. Пример регистрации резонансной структуры спектра. В отличие от рис. За РСС выражена более слабо. Вывод амплитуды спектра на рис.Зв в логарифмическом масштабе. Декабрь 1985 г.



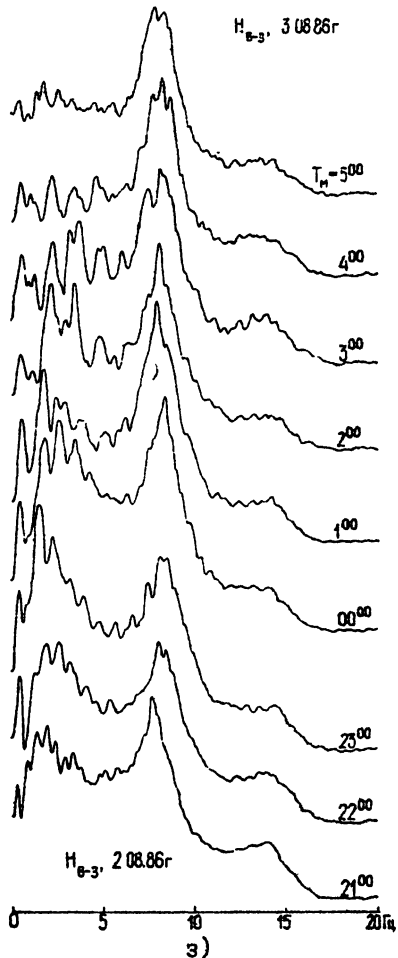
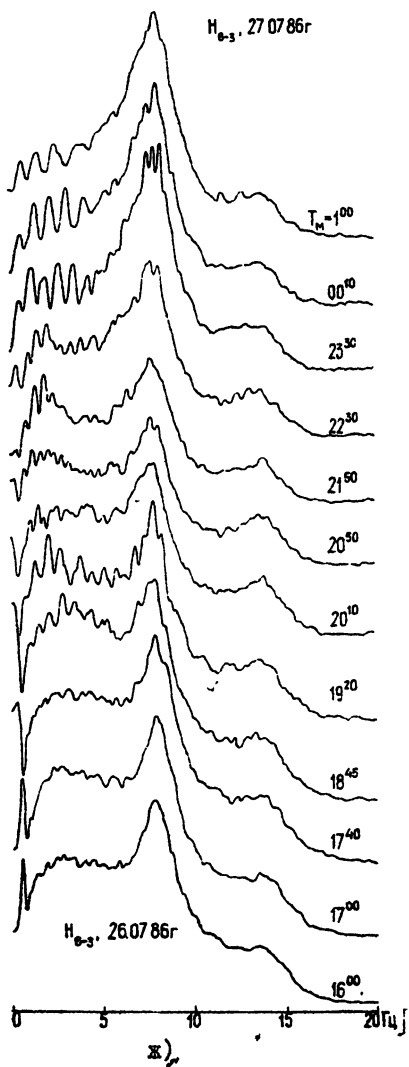
Р и с. 3г. Полный ночной профиль РСС для компоненты магнитного поля H_{c-Ю}, частотный масштаб РСС ΔF меняется от величины ΔF ≈ 0,6 Гц в вечерние часы (~ 16⁰⁰) до ΔF ≈ 1,8 Гц в полуденные. С 23⁰⁰ отмечается заметная деформация обгибающей спектра области первого шумового резонанса (F ~ 8 Гц) с масштабом по частоте, характерным для РСС. Февраль 1986 г.



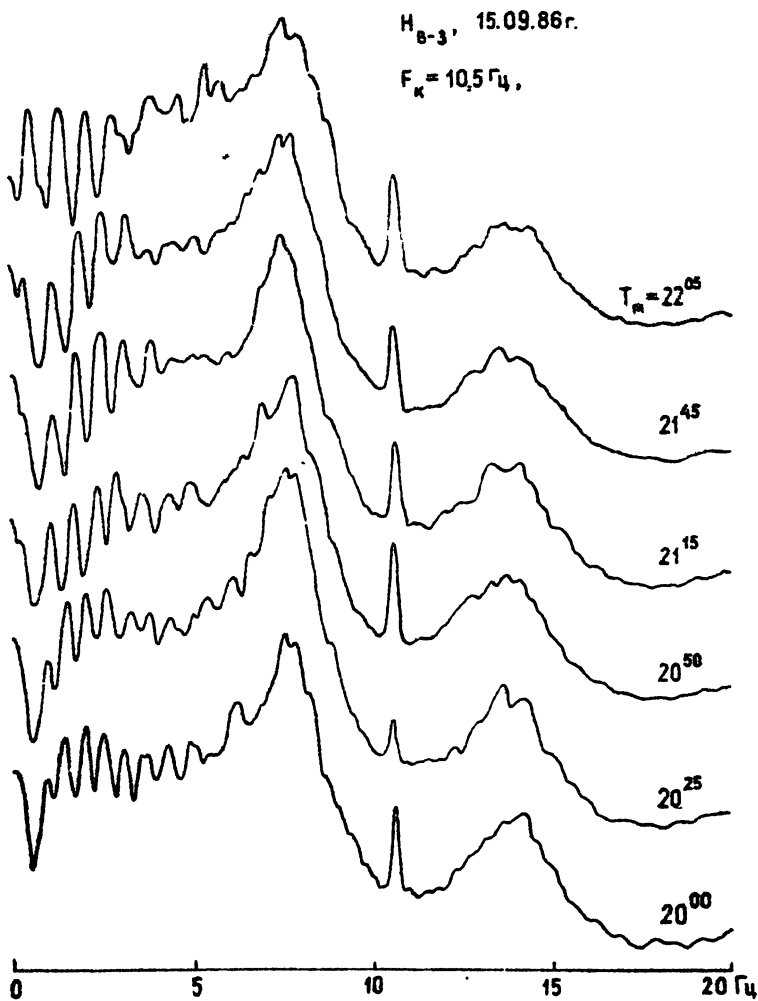
"Р и с. Зд. Пример регистрации резонансной структуры. РСС слабо выражена в компоненте H_{B-3} . Глубокое "расщепление" огибающей спектра первого шумановского резонанса $\varphi \sim 8$ Гц в компоненте H_{C-10} в 00⁰⁰ часов и отсутствие аналогичного эффекта в компоненте H_{B-3} в то же самое время. Апрель 1986 г.



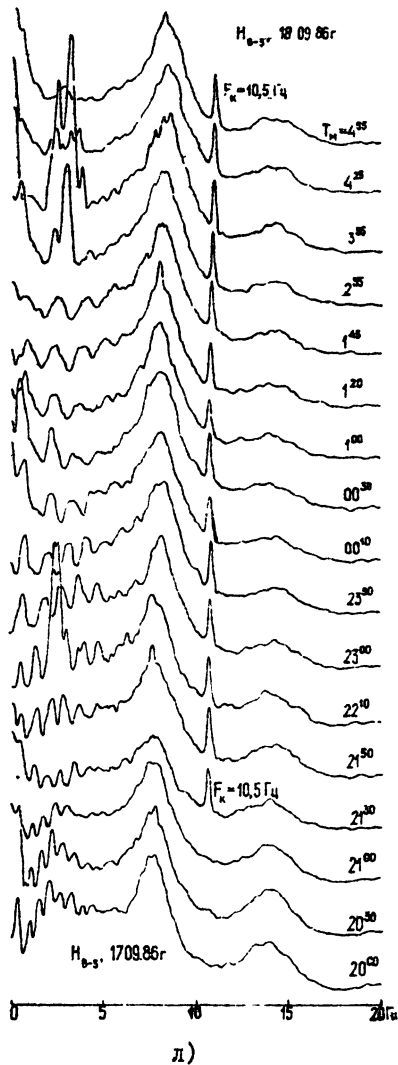
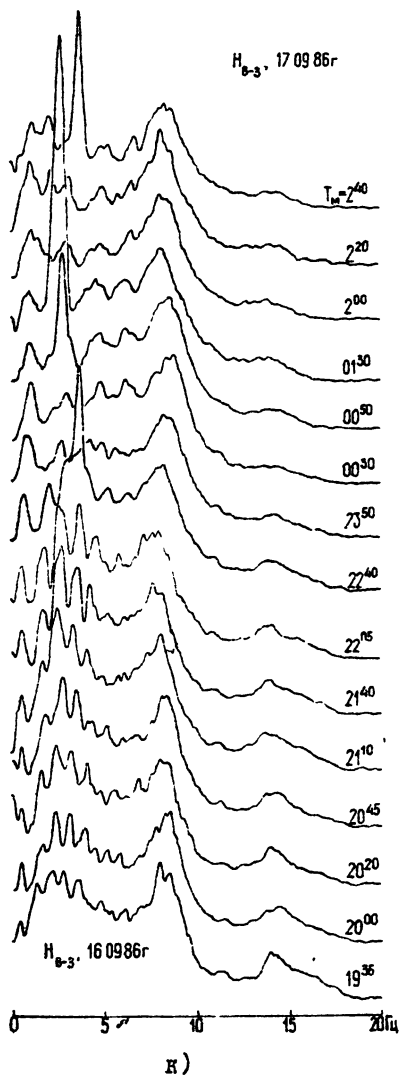
Р и с. 3е. Фрагмент регистрации резонансной структуры в летнее время. Общий подъем амплитуды спектра в районе частот (1 - 5 Гц) H_{6-3} вечернее время $T_{\text{моск}} \sim 21^{00}$ связан с местной грозовой активностью, падающей к полуночи. (Сравни с рис. 7.) Июнь 1986 г.



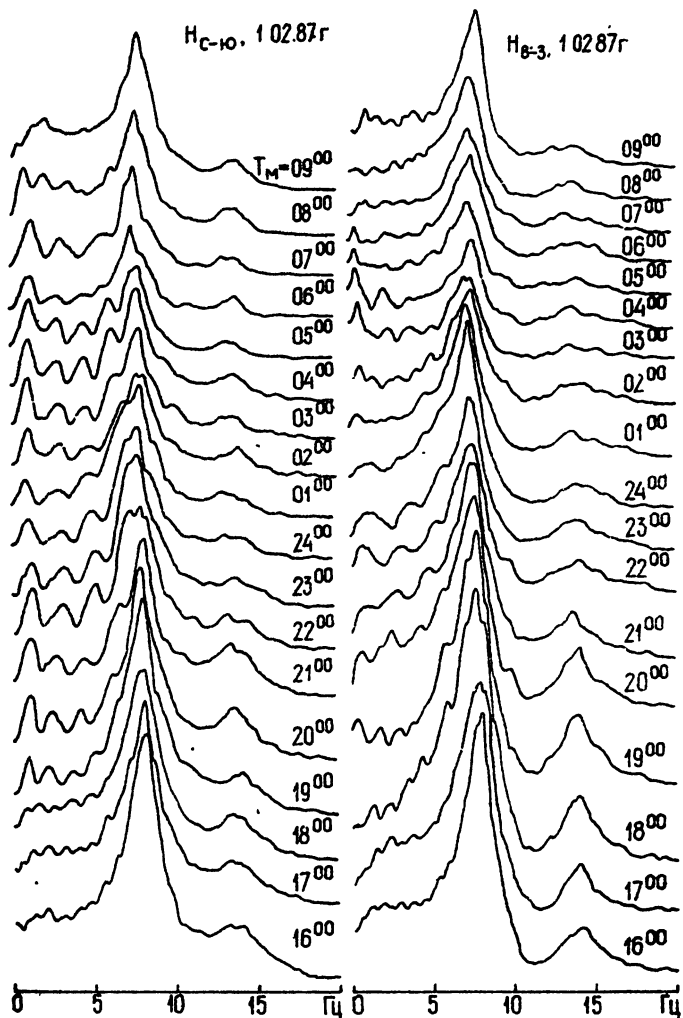
Р и с. 3. Пример регистрации РСС в летнее время.
 На рис. 3ж с $T_{\text{МОСК}} = 19^{20}$ до $T_{\text{МОСК}} = 20^{50}$ прослежива-
 ется омена периода РСС с $\Delta F \approx 0,8$ Гц до $\Delta F \approx 0,4$ Гц
 (Ср. с рис. 8, нижняя кривая.) Июль - август 1986 г.



Р и с. 3и. Фрагмент регистрации РСС в
осеннее время. Сентябрь 1986 г.



Р и с. 3. Примеры регистрации РСС в осеннее время. Мощные амплитудные выбросы в районе частот 0,5–5 Гц соответствуют магнитоферным излучениям типа Рс-I ("жемчужины"). Сентябрь 1986 г.

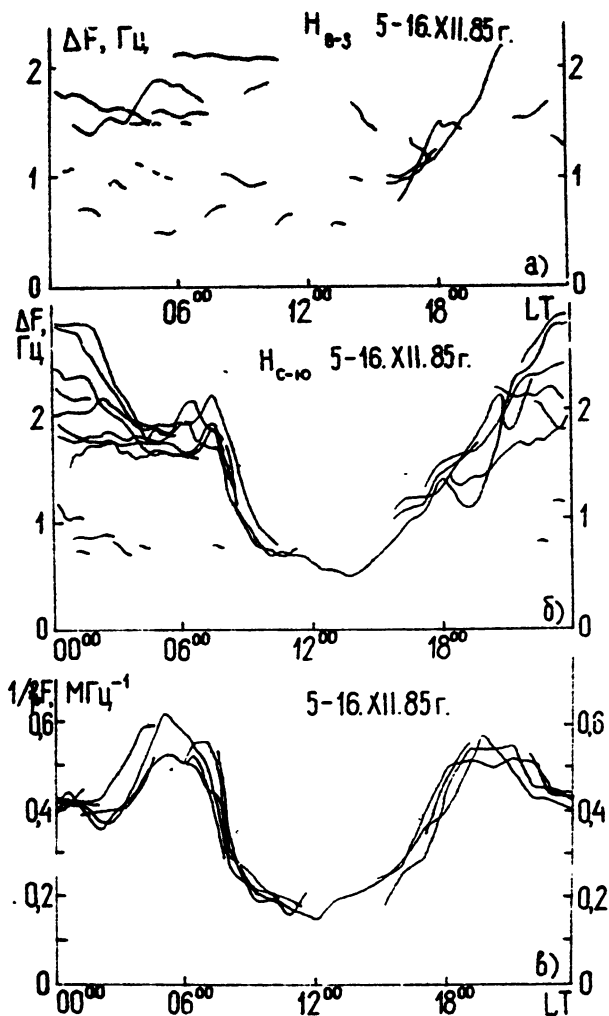


Р и с. Зм. Пример регистрации РСС
 для земных условий. (Ср. с рис. 3г) .
 Февраль 1987 г.

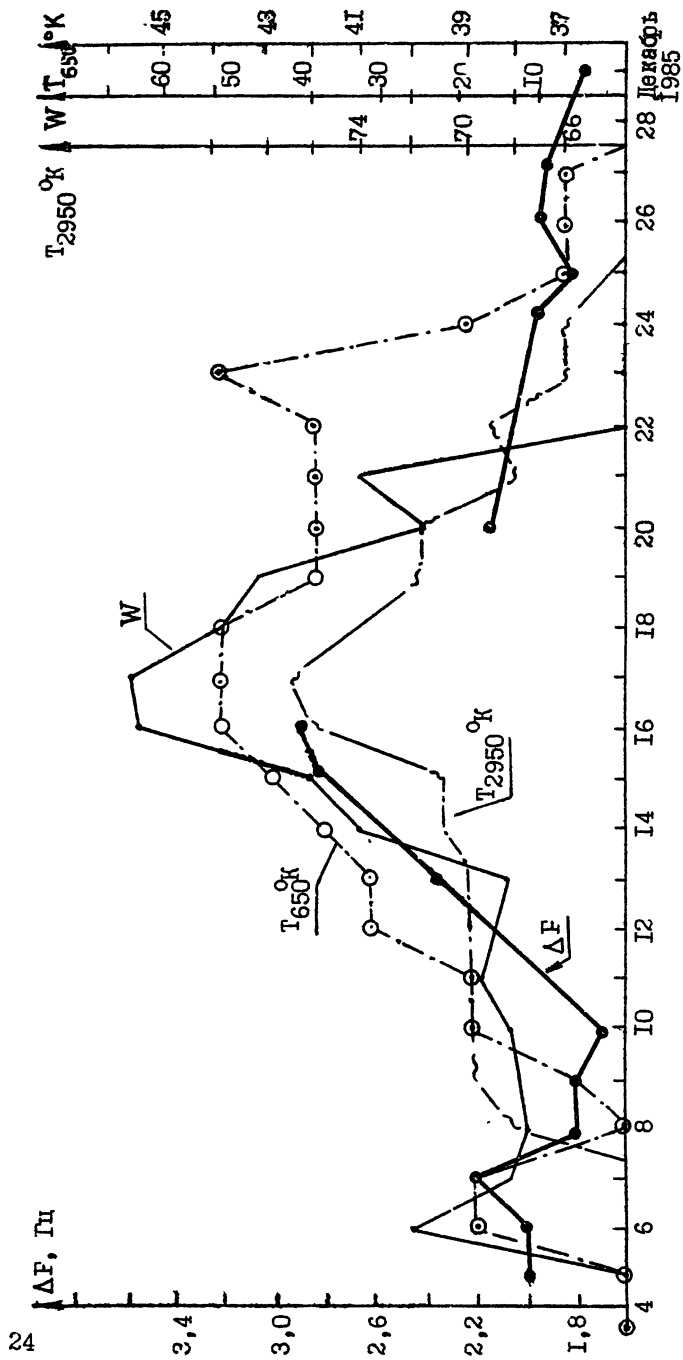
ΔF от времени суток, построенные по данным суточных прогонов за период 5-16.II.86 г. Отметим, что в отдельных случаях присутствует двойная резонансная структура, содержащая два частотных интервала ΔF_1 и ΔF_2 ($\Delta F_1 \approx 1/2 \Delta F_2$, см. рис. 4). Примечательны особенности поляризации сигналов. Характерно, что если резонансная структура четко выражена в $H_{с-ю}$ компоненте, то отсутствует или слабо выражена в $H_{в-з}$ компоненте, и наоборот (см. рис. 4а,б). В наших наблюдениях наиболее отчетливо резонансная структура наблюдалась в компоненте $H_{с-ю}$ в зимние месяцы и в $H_{в-з}$ в осенние. Следует заметить, что за указанный период наблюдений сильные спорадические магнитосферные сигналы наблюдались относительно редко, что, возможно, и позволило получить изложенные выше результаты. Кстати на рис. 3 (к-м) максимумы спектра на частоте $F \approx 3$ Гц, по-видимому, соответствуют магнитосферным излучениям типа PcI (аналогично максимум на $F \approx 1$ Гц рис. 3г).

4. Связь параметров РСС с состоянием ионосферы и солнечной активностью

Сопоставим суточный ход ΔF с поведением критической частоты слоя $F - F_{кр}$. На рис. 4в приведен суточный ход величины $F_{кр}^{-1}$ за тот же период наблюдений, что и на рис. 4а, б, построенный по данным ионосферной станции (Зименки, Горьковская обл.), расположенной в 100 км от пункта наблюдения. Из сопоставления рис. 4б и 4в следует, что в утренние и вечерние часы суточная зависимость близка к локальному суточному ходу величины $F_{кр}^{-1}$. Вместе с тем, в ночные часы наблюдаются существенные отличия во временных зависимостях ΔF и $F_{кр}^{-1}$. Приведенные на рисунке данные о суточном ходе периода РСС ΔF за 5-16.II.85 г. замечательны еще в следующем отношении. Этот интервал времени характеризуется возрастанием солнечной активности с 13 по 20 декабря 1985 г. (см. подробнее /17/). На рис. 5 приведены сравнительные зависимости изменения от дня ко дню периода структуры ΔF , усредненного за околополночные часы 0000-0200 LT, а также изменения числа солнечных пятен W и яркостных температур на частотах 650 и 2950 МГц T_{650} , T_{2950} , построенные по данным /17/. (К сожалению, с 14 по 17.II.85 г. отсутствуют данные о локальной критической частоте Г-слоя ионосферы в ночные часы вслед-



Р и с. 4. Суточный ход периода резонансной структуры ΔF в спектре компонент магнитного поля $H_{в-з}$ (вверху), $H_{с-ю}$ и обратной критической частоты F-слоя ионосферы (внизу) с 5-го по 16-е декабря 1985 г. Отдельные кривые соответствуют различным дням наблюдений

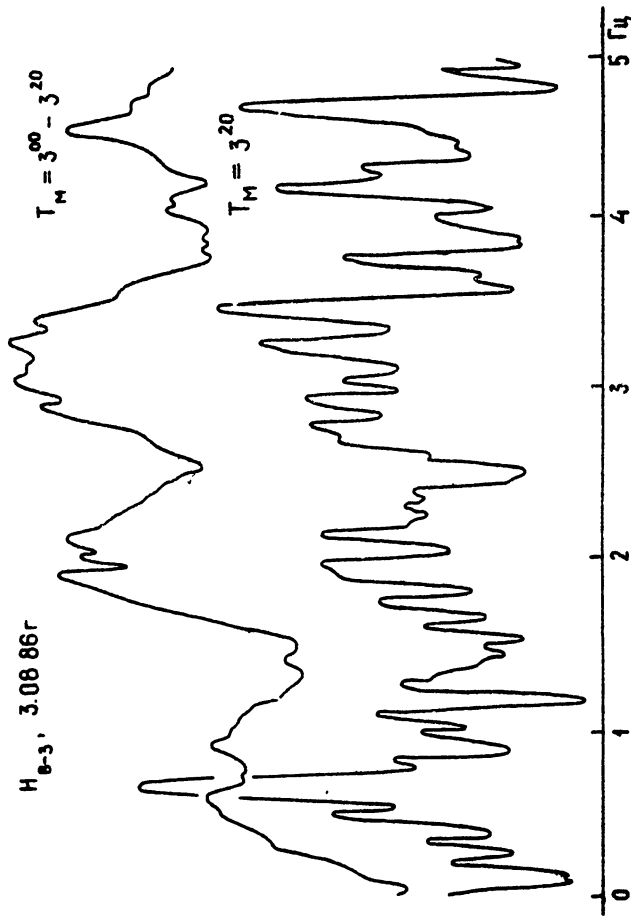


Р и с. 5. Месячный профиль числа солнечных пятен W , температуры радиолучения солнца T на частотах 650 и 2950 МГц и периода РСС ΔF в компоненте H_{α} - α , среднего за околополуденные часы $T_{\text{моск}} = (23^{00} - 02^{00})$ (ср. с рис. 4)

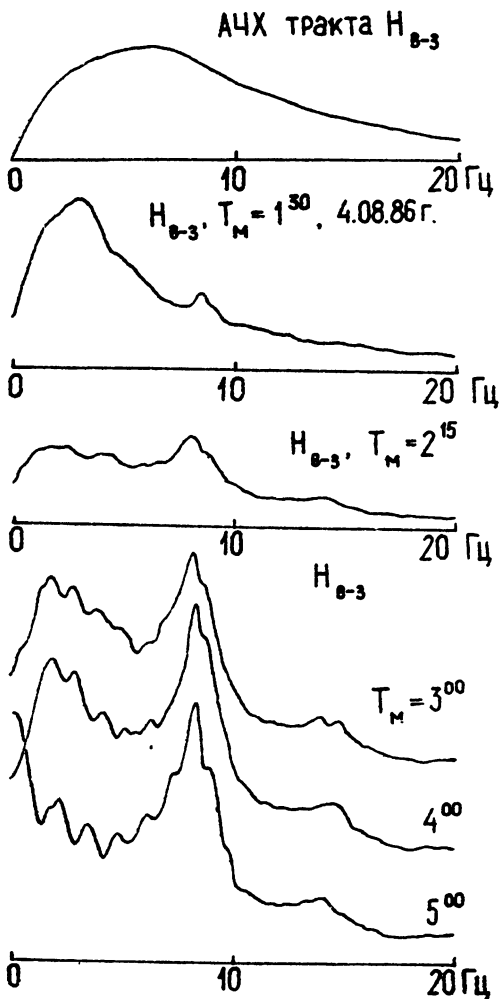
ствие увеличения поглощения радиоволн). Рис. 5 показывает корреляцию временного хода ΔF и солнечной активности. Из приведенных экспериментальных данных следует, что параметры РСС в значительной мере контролируются структурой ионосферы вблизи точки наблюдения.

5. Структура спектра первичного источника наблюдаемых шумов

Источниками регулярного шумового фона, изучаемого в настоящей работе, по-видимому, являются грозы. К этому выводу приводят следующие экспериментальные факты. Во-первых, обсуждаемая резонансная структура на оси частот расположена в непосредственной близости от первого шумановского резонанса и даже накладывается на него, грозовой источник которого общепризнан. Во-вторых, резонансная структура наблюдается регулярно, по крайней мере, в ночных условиях при различной геофизической и солнечной активности. И, наконец, наблюдение динамики спектра шума в реальном времени показывает, что вариации спектра сопровождаются регулярно повторяющимися всплесками (грозовые разряды), причем резонансная структура наиболее отчетливо проявляется на отдельных всплесках шума. Пример одновременной регистрации усредненного спектра и одной текущей реализации динамического спектра приведен на рис. 6. В формировании РСС существенную роль могут играть два фактора – особенности спектра источника и отклик естественных резонансных систем. Наличие РСС в спектре источника (молниевых разрядов) очень маловероятно. По крайней мере, имеющаяся литература не содержит каких-либо определенных указаний на этот счет (см., например, /3/). Летом 1986 г. удалось получить непосредственные данные о структуре спектра ночного грозового очага при его прохождении мимо точки наблюдения. Запись этого события приведена на рис. 7. Из рисунка следует, что РСС начинает проявляться, когда расстояние до источника (грозового очага) становится значительным (больше высоты промежутка земля-ионосфера). На этих расстояниях существенное влияние на формирование поля в точке наблюдения оказывает ионосфера (отраженные источники). В непосредственной близости от грозового центра наблюдается в основном ближнее поле молниевых разрядов, спектр которого, согласно рис. 7, не содержит резонансной структуры.



Р и с. 6. Единичная (неусредненная) реализация спектра мощного молибденового разряда, "высвечивающего" резонансную структуру - внизу. Усредненный спектр в той же компоненте поля $H_{\nu-3}$ (~ 30 реализаций) - вверху. Полоса анализа $\Delta F = 5 \text{ Гц}$ (разрежение по частоте $\Delta f = 0,025 \text{ Гц}$; во времени $\Delta t = 40 \text{ с}$), 3.0886 г , $T_M = 3^{00} - 3^{20}$



Р и с. 7. Прохождение ближнего грозового очага мимо точки наблюдения. Амплитудный масштаб вывода данных в $T_M = 1^{30}$ и $T_M = 2^{15}$ уменьшен в 2,5 раза по отношению к $T_M = 3^{00} - 5^{00}$. Ось частот в $T_M = 1^{30}, 2^{15}, 5^{00}$ соответствует нулевому уровню сигнала. $T_M = 01^{30}$ - вспышки молний в пределах прямой видимости, $T_M = 02^{15}$ - световые вспышки на горизонте, слабые раскаты грома; $T_M = 04^{00}$ небо очистилось, звезды. Вверху для сравнения приведена АЧХ приемного тракта.

6. Механизм формирования РСС

Наиболее вероятной причиной формирования обнаруженной резонансной структуры является влияние резонансных свойств ионосферы, в частности, ионосферного альфвеновского резонатора на грозовой электромагнитный шум. Как уже отмечалось, возможность существования ИАР была предсказана и теоретически обоснована в работах /7, 8/. В работе /18/ приведены численные расчеты прохождения короткопериодных геомагнитных пульсаций из магнитосферы на поверхность земли, подтверждающие выводы /7, 8/. ИАР существует благодаря наличию в ионосфере двух областей (по высоте) нарушения геометрической оптики для альфвеновских волн диапазона КПК: в нижней ионосфере и в области выше максимума F-слоя на спаде альфвеновского показателя преломления (см. рис. 1). Согласно /8/, расстояние между гармониками ИАР можно оценить по формуле

$$\Delta F = \frac{c}{2n_a L} \quad (1)$$

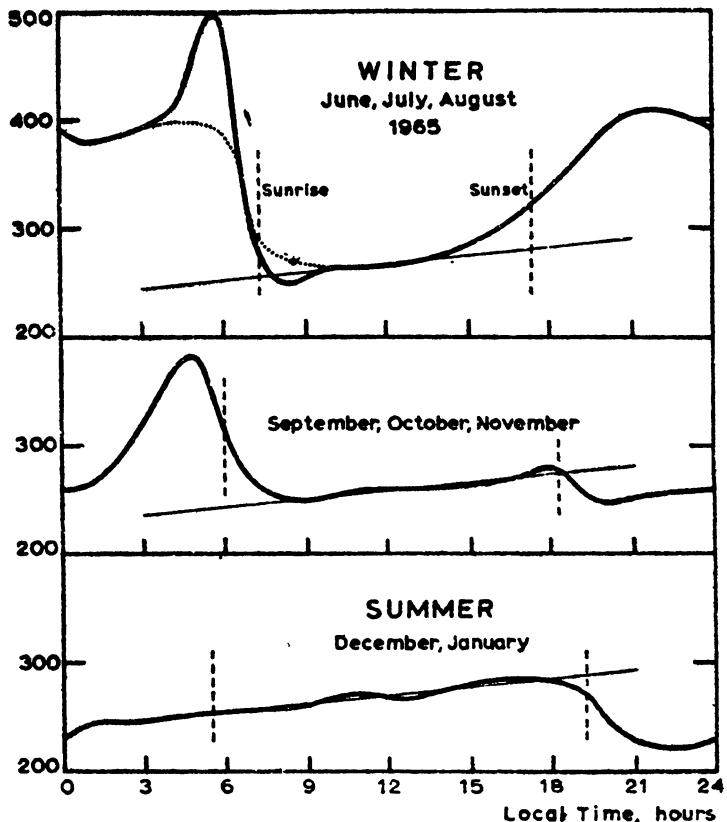
Здесь c - скорость света, L - характерный масштаб спада альфвеновского показателя преломления выше максимума F-слоя ионосферы, n_a - альфвеновский показатель преломления в максимуме F-слоя,

$$n_a = \frac{c\sqrt{4\pi\rho}}{H_0} \propto N_e^{1/2}, \quad (2)$$

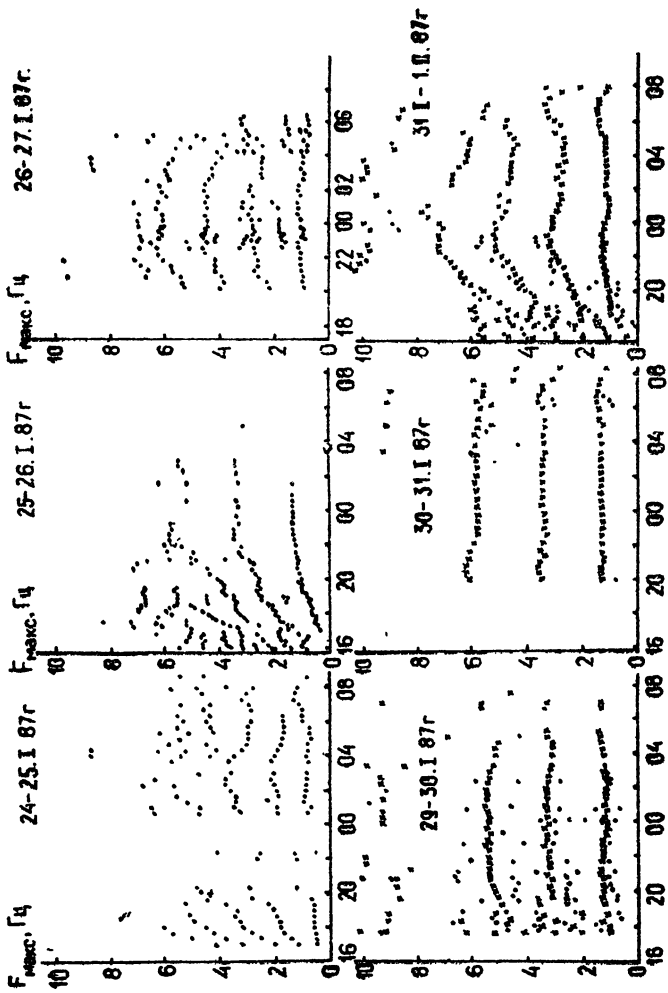
где H_0 - напряженность земного магнитного поля, ρ - плотность плазмы, N_e - электронная концентрация. Характерная величина $\Delta F \approx 0,5$ Гц ($n_a = 10^3$, $L = 300$ км) хорошо соответствует периоду резонансной структуры, наблюдаемой в эксперименте.

Зависимость ΔF от электронной концентрации ($\Delta F \propto N_e^{-1/2}$) совпадает с зависимостью величины $F_{кр}^{-1}$ от N_e . Этот факт естественным образом объясняет связь параметров РСС с состоянием ионосферы и суточный ход ΔF . С точки зрения излагаемой интерпретации отдельные отличия суточного хода ΔF и $F_{кр}^{-1}$ связаны с зависимостью ΔF от характерного вертикального масштаба ионосферы L (помимо

зависимости от N_a). На рис. 8 приведены экспериментальные зависимости толщины ионосферы $\Delta h = \int N_e dz / N_{e \max}$ от времени суток, заимствованные из работы /19/. Сравнение рис. 4, 9 и рис. 8 показывает подобие обсуждаемых зависимостей. Особенно бросается в глаза наличие в обоих случаях предутреннего максимума.



Р и с. 8. Сезонный ход "толщины" ионосферы $\Delta h = \int N_e dz / N_{e \max}$ /19/. Интегральная концентрация $\int N_e dz$ определяется по фарадеевскому вращению сигнала спутникового радиомаяка, $f = 136$ МГц. $N_{e \max}$ - концентрация в максимуме F - слоя ионосферы. Район наблюдения - Новая Зеландия



Р и с. 9. Положение максимумов ГСС на оси частот в период с 24.01 по 1.02 1987 г. в спектре двух горизонтальных компонент магнитного поля H_{0-y} (крестики) и H_{y-z} (точки). По горизонтальной оси московское время в часах

Из-за влияния ИАР входной импеданс ионосферы на ее нижней границе должен иметь резонансный характер аналогично входному импедансу отрезка длинной линии с несогласованной нагрузкой на конце. На качественном языке, непосредственно механизм формирования РСС из-за влияния ИАР, по-нашему мнению, состоит в трансформации поля ТН-поляризации (поле вертикального электрического источника в идеальном волноводе) в поле ТЕ-поляризации (поле вертикального магнитного источника) за счет холловских токов, возбуждаемых падающим полем в нижней ионосфере. Степень трансформации определяется величиной горизонтального электрического поля источника в нижней ионосфере, которая, в свою очередь, пропорциональна входному импедансу ионосферы, имеющему резонансную структуру. Ослабление и даже исчезновение РСС в дневные часы объясняется ослаблением резонансной структуры входного импеданса за счет большого омического затухания волн в дневной нижней ионосфере.

З а к л ю ч е н и е

Совокупность изложенных выше экспериментальных данных позволяет сформулировать следующий вывод. Обнаружена и исследована регулярно наблюдаемая резонансная структура спектра атмосферного электромагнитного шумового фона в диапазоне частот 0,1–10 Гц, которая наряду с шумановскими резонансами является фундаментальной характеристикой низкочастотного электромагнитного поля в полости Земля-ионосфера. За формирование резонансной структуры, по-видимому, ответственен ионосферный альфвеновский резонатор, влияющий на частотную характеристику импеданса верхней стенки полости Земля-ионосфера. Об этом свидетельствуют параметры резонансной структуры (частотный интервал ΔF между максимумами, особенности поляризации), ее суточный ход и динамика резонансной структуры при приеме электромагнитных сигналов, создаваемых изолированным очагом локальных гроз. Приведенные выше оценки и строгие теоретические расчеты полностью подтверждают сделанный выше вывод. В заключение авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность Л.В.Гришкевичу за предоставление ионосферных данных и Ю.В.Смирнову за неоценимую помощь в разработке приемной аппаратуры.

Л и т е р а т у р а

1. Schumann W.O. Über die Strahlungslosen Eigenschwingungen einer leitenden Kugel die von Luftschicht und einer Ionosphärenhülle umgeben. // Z. Naturforsch., 1952. - Bd. 7a. - S. 149-154.
2. Balser M., Wagner C.A. Observation of Earth-Ionosphere Cavity Resonances // Nature. - 1960. - V. 188, p. 638-641.
3. Блюх П.В. Николаенко А.П., Филиппов Ю.Ф. Глобальные электромагнитные резонансы в полости Земля-ионосфера. - Киев: Наукова Думка, 1977. - 200 с.
4. Terpley L.T., Landshoff R.K. Waveguide theory for ionospheric propagation of hydromagnetic emissions. // J. Geophys. Res. - 1966. - V. 71, N 5. - P. 1499.
5. Greifinger C., Greifinger P. Theory of hydromagnetic propagation in the ionospheric waveguide. // J. Geophys. Res. - 1968. - V. 73, N 23. - P. 7374-7490.
6. Greifinger C., Greifinger P. Waveguide propagation of micropulsations out of the plane of geomagnetic meridian. // J. Geophys. Res. - 1973. - V. 78, N 22. - P. 4611-4618.
7. Поляков С.В. О свойствах ионосферного альфвеновского резонатора. - В кн.: Симпозиум КАПГ по солнечно-земной физике. Тезисы докладов. Ч.3. - М.: Наука, 1976. - С. 72-73.
8. Поляков С.В., Рапопорт В.О. Ионосферный альфвеновский резонатор // Геомагнетизм и аэронавигация. - 1981. - Т. 21, № 5. - С. 816-822.
9. Поляков С.В., Рапопорт В.О., Трахтенгерц В.Ю. Альфвеновский свип-мазер // Физика плазмы. - 1983. - Т. 9, Вып. 2. - С. 371-377.
10. Беляев П.П., Поляков С.В., Рапопорт В.О., Трахтенгерц В.Ю. О тонкой структуре излучения альфвеновского мазера // Геомагнетизм и аэронавигация. - 1981. - Т. 21, № 2. - С. 442-448.
11. Трахтенгерц В.Ю., Фельдштейн А.Я. Влияние неоднородного профиля альфвеновской скорости на расщепление магнитосферной конвекции // Геомагнетизм и аэронавигация. - 1981. - Т. 21, № 5. - С. 951-953.

12. Trachtengerts V.Yu., Feldstein A.Yu. Quiet auroral arcs: ionosphere effect of magnetospheric convection stratification. //Planet.Space Sci.-1984.-V.32, N2.-P.127-134.
13. Гульельми А.В., Троицкая В.А. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы. - М.: Наука, 1973. - 208 с.
14. Зотов О.Д., Клайн Б.И., Русаков Н.Н. О наблюдениях шумановских резонансов в полярной шапке. - В кн.: Структура электромагнитного поля геомагнитных пульсаций. - М.: Наука, 1980. - С. 139 - 142.
15. Egeland A., Larsen T.R. Fine structure of the Earth-Ionosphere Cavity Resonances.//J.Geophys.Res.-1968.-V.73.-P.4986-4990.
16. Beamish D., Tranis A. High resolution spectral characteristics of the Earth ionosphere cavity resonances.//J.Atm.Terr.Phys.-1986.-V.48,N2.-P.187-203.
17. Солнечные данные 1985г. Бюллетень № 12. - Л.: Наука, 1986, 10. - 96 с.
18. Prikner K., Vagner V. Numerical modelling of the ionospheric filtration of an ULF micropulsation signal.//Studia geophys. et geodet.-1983.-V.27.-P.173-191.
19. Titheridge J.E. The slab thickness of the mid-latitude ionosphere.//Planet.Space Sci.-1973.-V.21.-P.1775-1793.

Дата поступления статьи
II мая 1987 г.

Павел Петрович Беляев
Сергей Владимирович Поляков
Виктор Осеевич Рапопорт
Виктор Юрьевич Трахтенгерц

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЗОНАНСНОЙ СТРУКТУРЫ
СПЕКТРА АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ШУМОВОГО ФОНА В
ДИАПАЗОНЕ КОРОТКОПЕРИОДНЫХ ГЕОМАГНИТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ**

Подписано в печать 10.08.87 г. МЦ 14280.
Формат 60 x 84/16. Бумага множительная,
Объем 2,05 усл.печ.л. Заказ 4602. Тираж 120.
Бесплатно

Отпечатано на ротапринте НИРФИ