

УДК 550.38

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

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

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  $\Delta F \approx 0,5 \div 2,8$  Гц. Величина  $\Delta F$  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 альфевеновского резонатора.

**1. Введение.** Диапазон короткопериодных геомагнитных пульсаций (КПК,  $\Delta F \approx 0,1 \div 10$  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 околосземной плазмы в диапазоне КПК является существование волновода для быстрых магнитозвуковых волн на ионосферных высотах [4, 5], обусловленного немонотонным профилем альфевеновского 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.

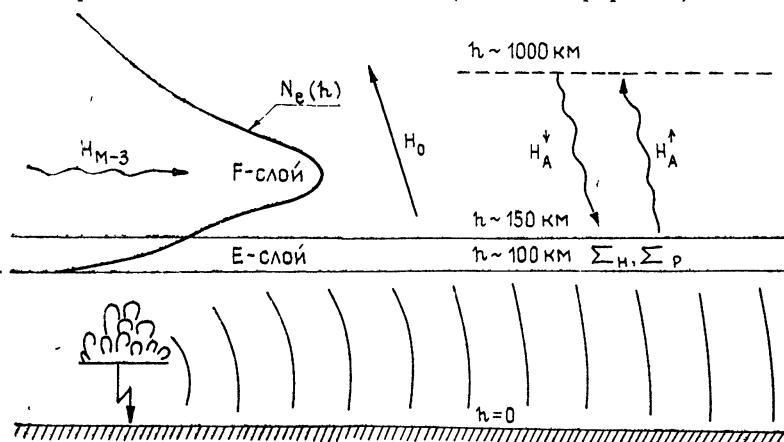


Рис. 1.

В 1976 году [7] 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 ( $\omega = k_z v_A$ ,  $\omega$  — частота,  $k_z$  — проекция волнового вектора на направление магнитного поля) существующий на высотах слоя  $F$  (рис. 1) немонотонный профиль показателя преломления  $n_A$  еще не обеспечивает возможности полного внутреннего отражения волн, и требуется обязательное нарушение приближения 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 резонатора (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 вышесказанным 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.

**2. Техника и методика измерений.** Стандартная техника, предназначенная для геофизических исследований в диапазоне  $\Delta F = 0,1 \div 10$  Гц, оказалась не приспособленной для анализа тонкой структуры спектра атмосферного шумового фона, создаваемого грозовыми источниками. В НИРФИ была разработана высокочувствительная приемная аппаратура, включающая индукционные датчики полного вектора  $H$  магнитного поля и малошумящие предварительные усилители. Уровень собственных шумов в горизонтальном компоненте ( $H_{c-y}$ ;  $H_{v-z}$ )  $5 \cdot 10^{-5}$   $\mu\text{Гц}^{1/2}$ , вертикальном компоненте ( $H_z$ )  $5 \cdot 10^{-6} \mu\text{Гц}^{1/2}$ . Отличие в чувствительностях антенн  $H_\tau$  и  $H_z$  связано с различным конструктивным исполнением. Антенны  $H_\tau$  выполнены в виде катушек (количество витков  $N \approx 350000$ ) с пермаллоевым сердечником  $\mu_{\text{эфф}} = 5000$ . Антenna  $H_z$  выполнена в виде рамки ( $N = 18$ ,  $S = 4 \cdot 10^4 \text{ м}^2$ ). Приемный пункт располагался вблизи г. Горького,  $L \sim 2,65$ . Ориентация антенн  $H_{c-y}$ ,  $H_{v-z}$  определялась по компасу без учета поправок на магнитное склонение.

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

**3. Обнаружение резонансной структуры спектра (РСС).** Первые регистрации резонансной структуры были получены в июне 1985 года в околополуночное время с усреднением по  $\sim 100$  независимым спектральным реализациям. Пример первой регистрации приведен на рис. 2а, где можно видеть относительно слабо выраженную резонансную структуру с частотным интервалом между максимумами (минимумами)  $\Delta F \sim 0,5$  Гц. На рис. 2д приведен типичный пример регистрации в полосе  $\Delta F = 0 \div 20$  Гц, полученный в более поздних экспериментах. Максимумы спектра на частотах  $F \sim 8$  Гц, 14 Гц соответствуют первому и второму шумановским резонансам. Узкая спектральная линия между шумановскими резонансами — частотная калибровка ( $F_K = 11,25$  Гц);

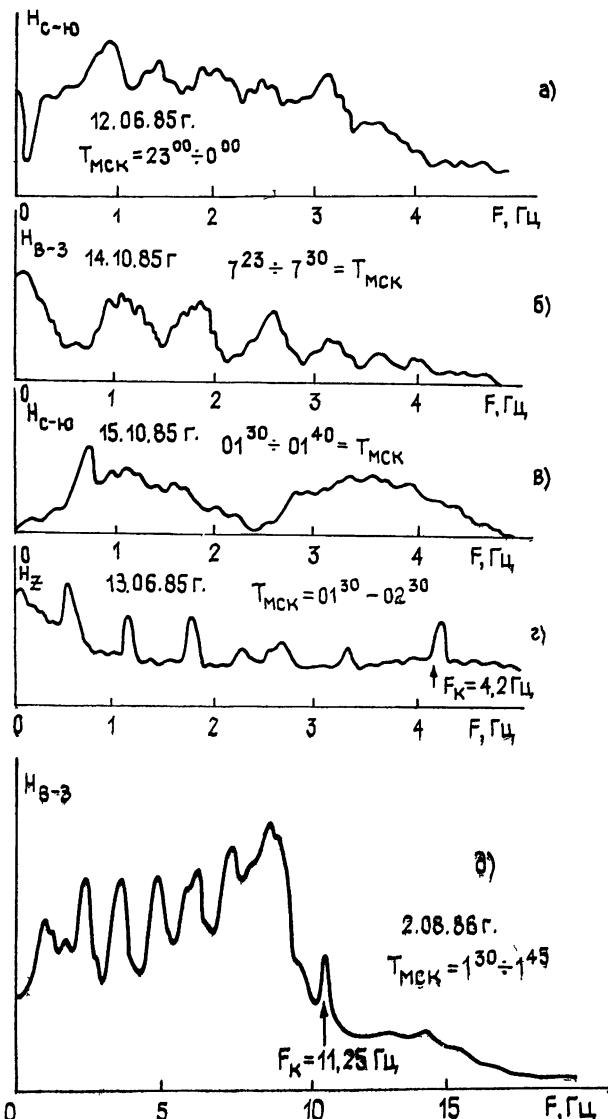


Рис. 2.

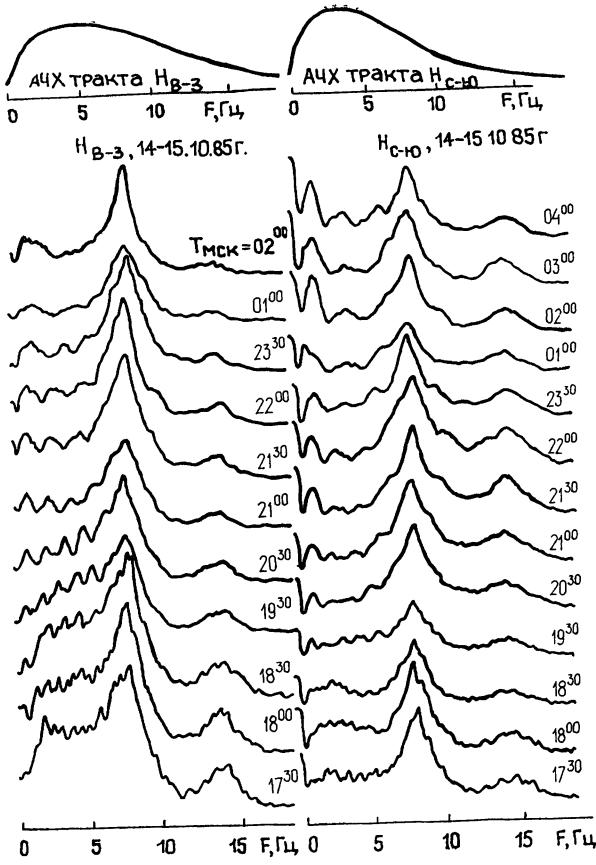
Нулевой уровень вблизи верхнего края диапазона обусловлен высокочастотной фильтрацией входного сигнала. Обсуждаемая резонансная структура спектра сосредоточена в области частот  $\Delta F \simeq 10$  Гц. По характеру спектра резонансная структура очень похожа на спорадические излучения типа «гидромагнитные шипения» [13]. Согласно [13] этот тип излучений на геомагнитных обсерваториях наблюдается очень редко и связывается с генерацией альфвеновских волн в магнитосфере. В процессе развития циклотронной неустойчивости. Результаты эпизо-

дических наблюдений структуры спектра, подобной рис. 2, приводятся также в работах [3, 14–16]. В отличие от цитируемых работ мы утверждаем, что резонансная структура спектра, подобная рис. 2, является наряду с шумановскими резонансами регулярно наблюдалась фундаментальной характеристикой шума в диапазоне КПК.

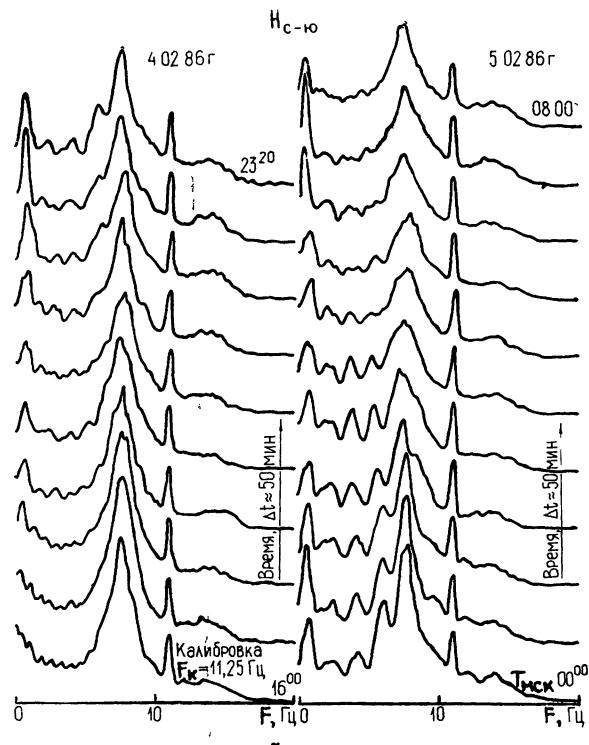
Сказанное относится к спектрам горизонтальных компонент магнитного поля  $H_\tau$ . В компоненте  $H_z$  структуры спектра, подобной  $H_\tau$ , достаточно отчетливо не наблюдалось, если не считать первых регистраций усредненных спектров, полученных летом 1985 года, когда в компоненте  $H_z$  были зарегистрированы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

**4. 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 г.) 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–е. Во всех прогонах в области частот  $\Delta F \sim 1 \div 10$  Гц четко наблюдается резонансная структура с частотным интервалом между резонансными частотами в пределах  $\Delta F = 0,5 \div 2,8$  Гц. Величина  $\Delta F$  имеет характерный суточный ход:  $\Delta F$  максимальна вочные часы и относительно быстро уменьшается утром и вечером (см. рис. 2). Глубина модуляции спектра максимальна ночью (до 50%) и резко уменьшается в утренние и вечерние часы. В дневное время РСС наблюдается очень редко. Вочные часы обсуждаемая структура накладывается на первый максимум шумановского резонанса и приводит к его «расщеплению», что, по-видимому, наблюдалось ранее [3]. На рис. 4а, б приведены зависимости  $\Delta F$  от времени суток, построенные по данным суточных прогонов за период 5–16.11.85 г. Отметим, что в отдельных случаях присутствует двойная резонансная структура, содержащая два частотных интервала  $\Delta F_1$  и  $\Delta F_2$  ( $\Delta F_1 \approx (1/2)\Delta F_2$ , см. рис. 4). Примечательны особенности поляризации сигналов. Характерно, что если резонансная структура четко выражена в  $H_{C-y}$ -компоненте, то отсутствует или слабо выражена в  $H_{B-z}$ -компоненте, и наоборот (см. рис. 4а, б). В наших наблюдениях наиболее отчетливо резонансная структура наблюдалась в компоненте  $H_{C-y}$  в зимние месяцы и в  $H_{B-z}$  — 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. 3д максимумы спектра на частоте  $F \sim 3$  Гц, по-видимому, соответствуют магнитосферным излучениям типа Pcl (аналогично максимум на  $F \sim 1$  Гц рис. 3б).

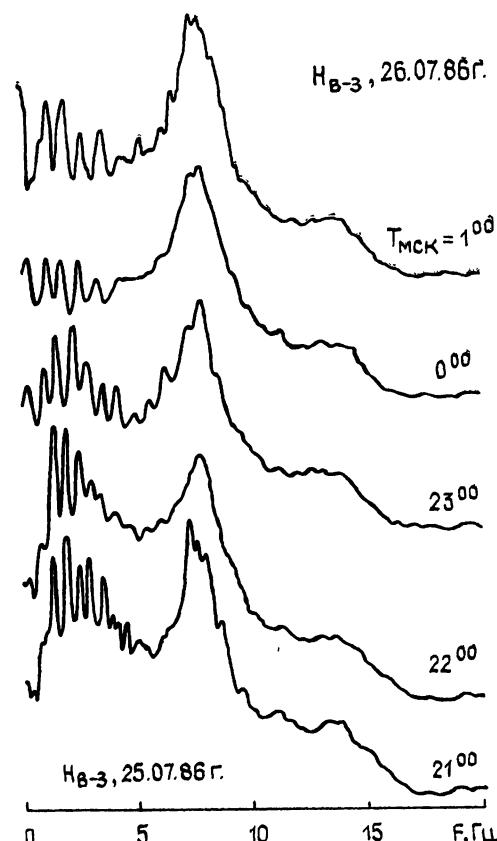
**5. Связь параметров РСС с состоянием ионосферы и солнечной активностью.** Сопоставим суточный ход  $\Delta F$  с поведением критической частоты слоя  $F - f_0 F$ . На рис. 4в приведен суточный ход величины  $f_0^{-1} F$  за тот же период наблюдений, что и на рис. 4а, б, построенный по данным ионосферной станции (Зименки, Горьковская обл.), расположенной в 100 км от пункта наблюдения. Из сопоставления рис. 4б и рис. 4в следует, что в утренние и вечерние часы суточная зависимость  $\Delta F$  близка к локальному суточному ходу величины  $f_0^{-1} F$ . Вместе с тем, вочные часы наблюдаются существенные отличия во временных зависимостях  $\Delta F$  и  $f_0^{-1} F$ . На рис. 5 приведены результаты обработки суточного хода частот, соответствующих максимумам резонансной структуры спектра за период 24–31 января 1987 года. Приведенные на рис. 4 данные о суточном ходе периода РСС  $\Delta F$  за 5–16.12.85 г. замечательны еще в следующем отношении. Этот интервал времени



a)



б)



в)

$H_{B-3}, 26.07.86г.$

$T_{МСК} = 1^{00}$

$0^{00}$

$23^{00}$

$22^{00}$

$21^{00}$

$H_{B-3}, 25.07.86г.$

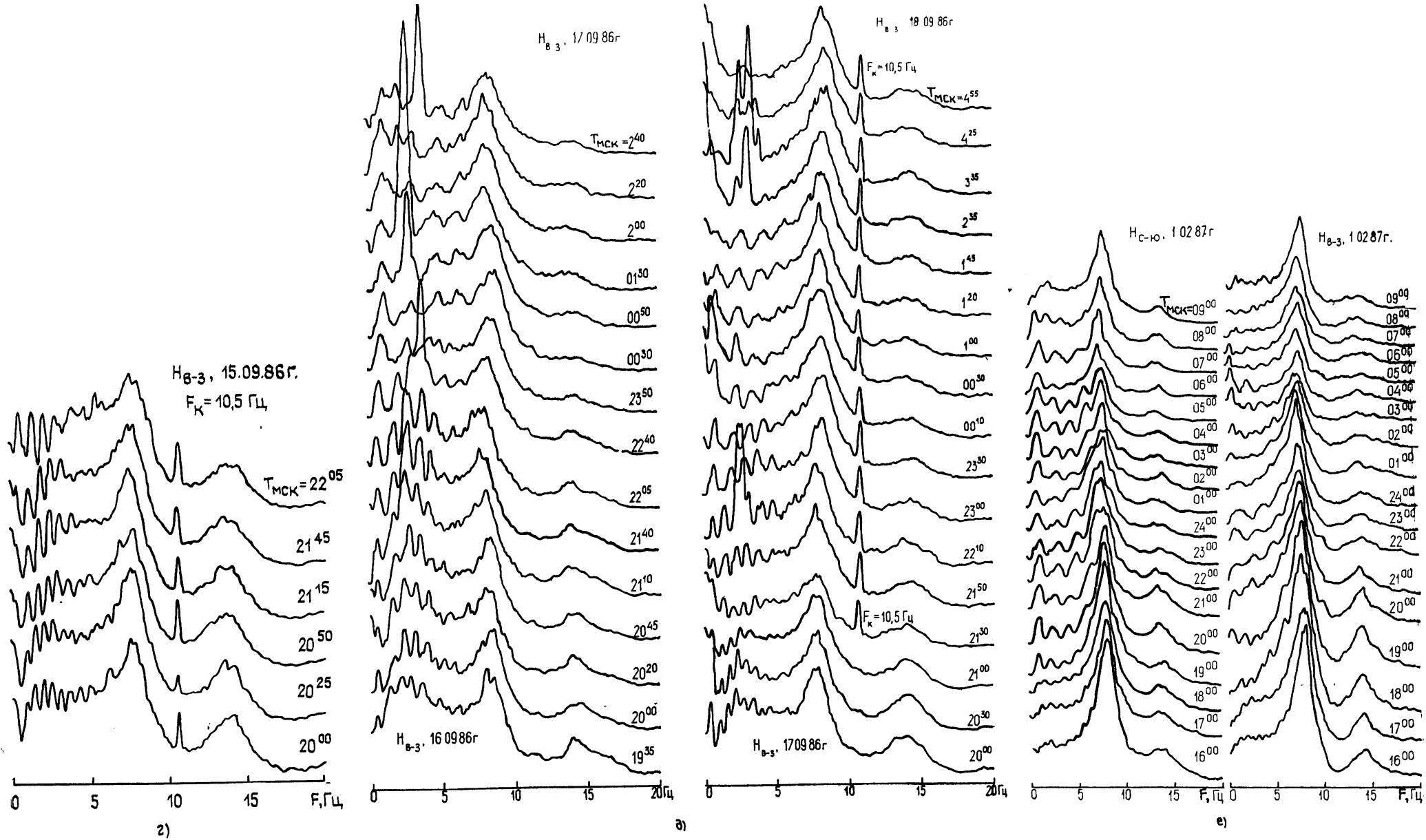


Рис. 3а—е. Примеры регистрации РСС в 1985—1987 гг.: а) вверху приведены амплитудно-частотные характеристики приемных трактов, снятые с использованием внешней калибровочной рамки в качестве источника калибровочного поля; б) на частоте  $F_k = 11,25$  Гц калибровочный сигнал, возбуждаемый внешней рамкой (аналогично г, д); начиная с  $T_{мск}=23,00$  наблюдается заметная деформация огибающей спектра в области первого шумановского резонанса ( $F_{ш}=8$  Гц) с масштабом по частоте, характерным для РСС (ср. с е), в) общий подъем амплитуды спектра на частотах 1—5 Гц в вечернее время связан с местной грозовой активностью (рис. 3д; 8).

характеризуется возрастанием солнечной активности с 13.12.85 г. по 20.12.85 г. (см. подробнее [17]). На рис. 6 приведены сравнительные зависимости изменения ото дня ко дню периода структуры  $\Delta F$ , усредненного за околополуночные часы 00.00—02.00 LT, а также изменения

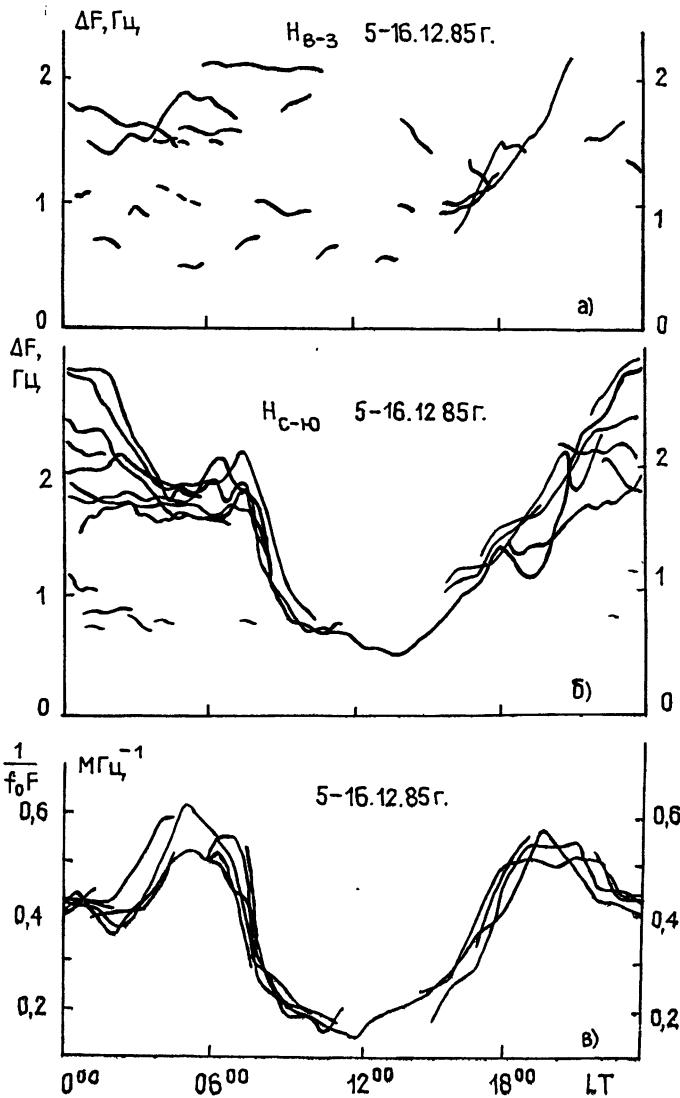


Рис. 4.

числа солнечных пятен  $W$  и яркостных температур на частотах 650 МГц и 2950 МГц  $T_{650}$ ,  $T_{2950}$ , построенные по данным [17]. (К сожалению, с 14 по 17.12.85 г. отсутствуют данные о локальной критической частоте  $F$ -слоя ионосферы в ночные часы вследствие увеличения поглощения радиоволн.) Рисунок показывает корреляцию временного хода  $\Delta F$  и солнечной активности. Из приведенных экспериментальных данных следует, что параметры РСС в значительной мере контролируются структурой ионосферы вблизи точки наблюдения.

**6. 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 общепризнаен. Во-вторых, резонансная

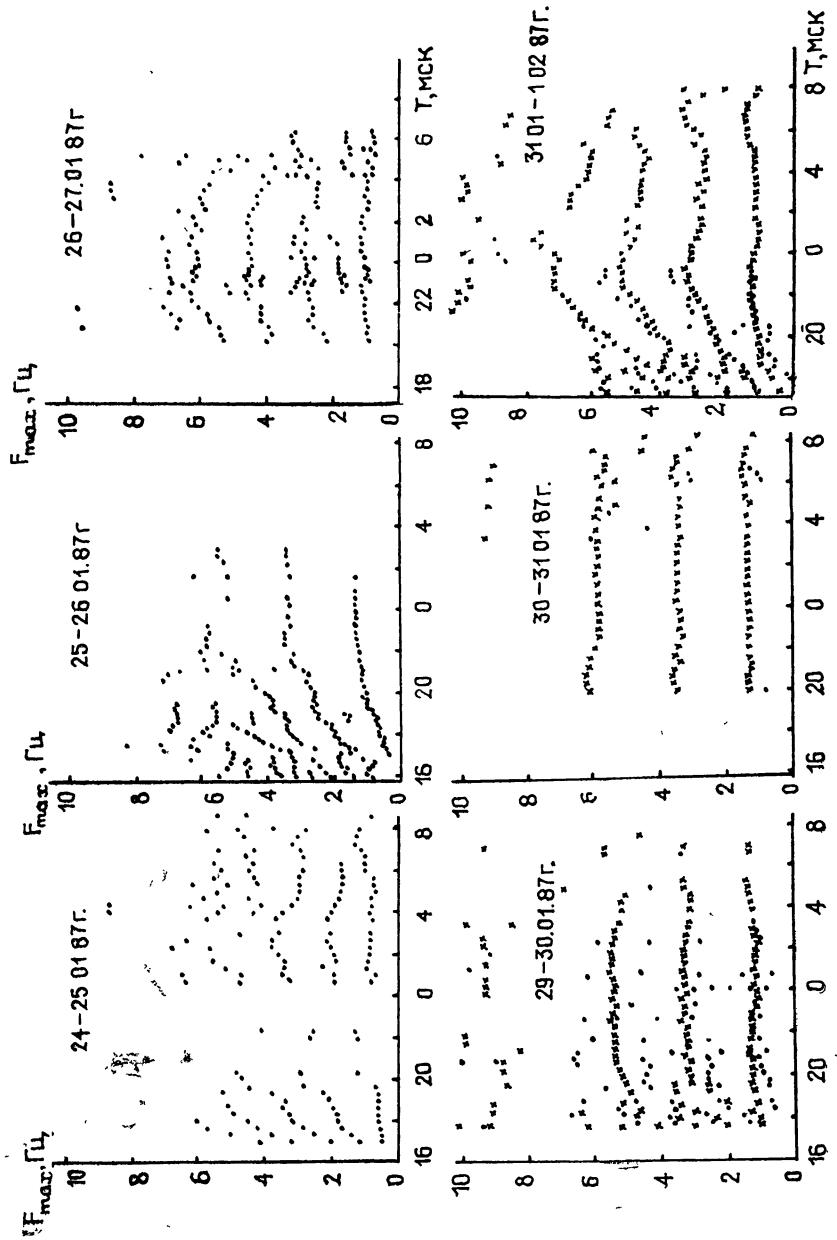


Рис. 5.

структур 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. 7а, б. В формировании РСС существенную роль могут играть два фактора — особенности спектра источника и отклик естественных резонансных систем. Наличие РСС в спектре источника (молниевого разряда) очень маловероятно. По крайней мере имеющаяся литература не содержит каких-либо определенных указаний на этот счет (см., например, [3]).

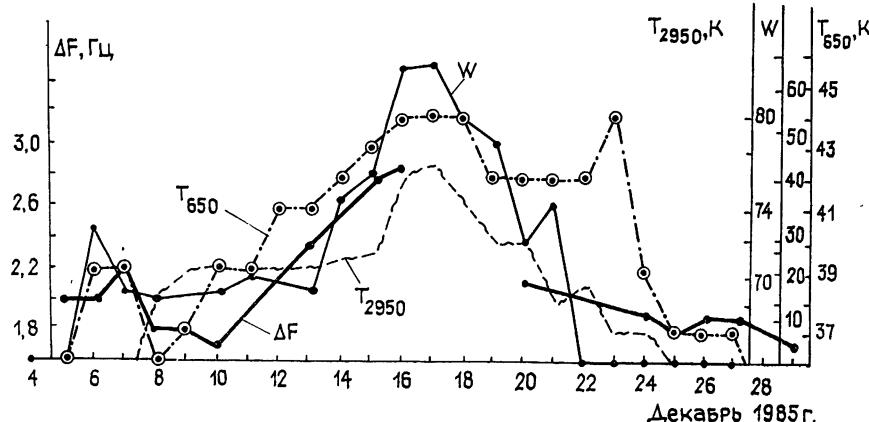


Рис. 6.

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. 8а—г. 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 которых, согласно рис. 8, не содержит резонансной структуры.

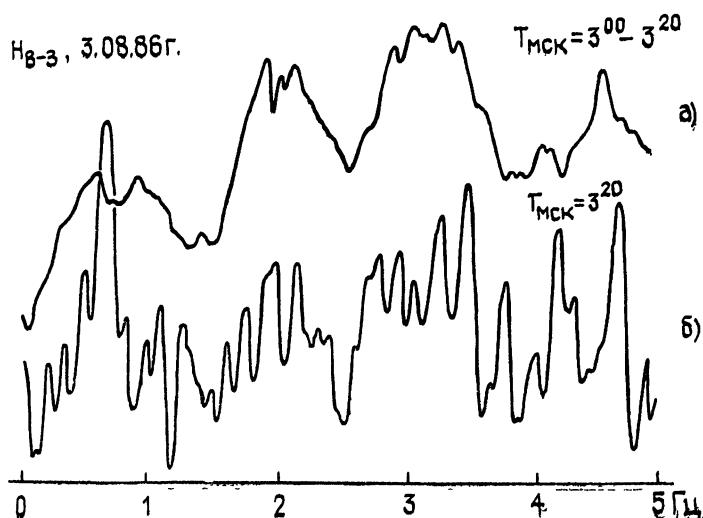


Рис. 7.

**7. Механизм формирования РСС.** Наиболее вероятной причиной формирования обнаруженной резонансной структуры является влияние свойств ионосферы, в частности ионосферного альфеновского 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 альфеновских волн диапазона КПК: в нижней ионосфере и в области выше максимума  $F$ -слоя на спаде альфеновского 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 альфеновского показателя преломления выше максимума  $F$ -слоя ионосферы,  $n_A$  — альфеновский показатель преломления в максимуме  $F$ -слоя,

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

Рис 8. а) Амплитудно-частотная характеристика приемного тракта  $H_{B-3}$ , б)  $T_{МСК}=1 ч 30 мин$ : близкая гроза, молнии в поле зрения; в)  $T_{МСК}=2 ч 15 мин$ : гроза уходит, молнии на горизонте; г)  $T_{МСК}=3 ч$ : тихо, заринцы;  $T_{МСК}=5 ч$ : чистое звездное небо. Масштаб вывода увеличен в 2,5 раза по отношению к б), в)

где  $H_0$  — напряженность земного магнитного поля,  $\rho$  — 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, наблюданной в эксперименте.

Зависимость  $\Delta F$  от электронной концентрации ( $\Delta F \propto N_e^{-1.2}$ ) совпадает с зависимостью величины  $f_0^{-1}F$  от  $N_e$ . Этот факт естественным образом объясняет связь параметров РСС с состоянием ионосферы и суточный ход  $\Delta F$ . С точки зрения излагаемой интерпретации отдельные отличия суточного хода  $\Delta F$  и  $f_0^{-1}F$  связаны с зависимостью  $\Delta F$  от характерного вертикального масштаба ионосферы  $L$  (помимо зависимости от  $n_A$ ). На рис. 9 приведены зависимости толщины ионосферы  $\Delta h = \int N_e dz / N_{e \max}$  от времени суток, заимствованные из работы [19]. Сравнение рис. 4 и 9 показывает подобие обсуждаемых зависимостей. Особенно бросается в глаза наличие в обоих случаях предутреннего максимума.

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.

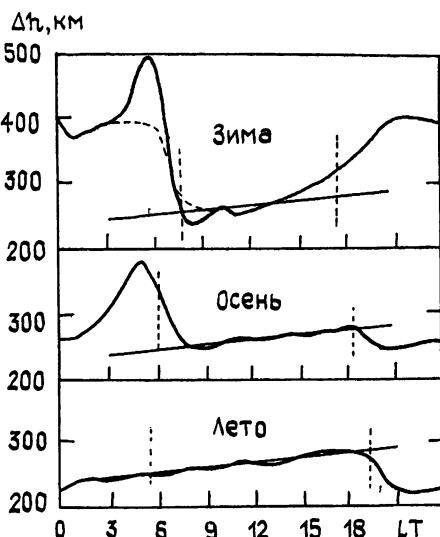


Рис. 9.

**8. Заключение.** 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, ответствен ионосферный альфвеновский резонатор, влияющий на частотную характеристику импеданса верхней стенки полости Земля—ионосфера. Об этом свидетельствуют параметры резонансной структуры (частотный интервал  $\Delta F$  между максимумами, особенности поляризации), ее суточный ход и динамика резонансной структуры при приеме электромагнитных сигналов, создаваемых изолированным очагом локальных гроз. Приведенные выше оценки подтверждают сделанный вывод.

В заключение авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность Ю. В. Смирнову за помощь в разработке аппаратуры и Л. В. Гришкевичу за предоставление ионосферных данных.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Schuman W. O. // Z. Naturforsch. 1952. V. 7a. S 144.
2. Balser M., Wagner C. A. // Nature. 1960. V. 188. P. 638.
3. Блиох П. В., Николаенко А. П., Филиппов Ю. Ф. Глобальные электромагнитные резонансы в полости Земля—ионосфера — Киев: Наукова думка, 1977. — 200 с.
4. Tepley L. T., Landshoff R. K. // J. Geophys. Res. 1966. V. 71 P. 1499.
5. Greifinger C., Greifinger P. // J. Geophys. Res. 1968. V. 73 P. 7473.
6. Greifinger C., Greifinger P. // J. Geophys. Res. 1973. V. 78. P. 4611.
7. Поляков С. В. Тезисы докладов Симпозиума КАПГ по солнечно-земной физике.— М.: Наука, 1976. Ч. 3. С. 72
8. Поляков С. В., Рапопорт В. О // Геомагнетизм и аэрономия 1981. Т. 21. № 5. С. 816.
9. Поляков С. В., Рапопорт В. О., Трахтенгерц В. Ю. // Физика плазмы. 1983. Т. 9. Вып. 2. С. 317.
10. Беляев П. П., Поляков С. В., Рапопорт В. О., Трахтенгерц В. Ю. // Геомагнетизм и аэрономия. 1984 Т. 24. Вып. 2. С. 242.
11. Трахтенгерц В. Ю., Фельдштейн А. Я. // Геомагнетизм и аэрономия. 1981. Т. 21. С. 951.

12. Trachtengerts V. Yu., Feldstein A. Ya. // Planet. Space Sci. 1984. V. 32. P. 127.
13. Гульельми А. В., Троицкая В. А. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы. — М: Наука, 1973. — 210 с.
14. Зотов О. Д., Клайн Б. И., Русаков Н. Н. В кн.: Структура электромагнитного поля геомагнитных пульсаций — М: Наука, 1980. С. 139.
15. Egeland H., Larsen T. R. // J. Geophys. Res. 1968. V. 73. P. 4986.
16. Beamish D., Tzanis A. // J. Atm. Terr. Phys. 1986. V. 48. № 2. P. 187.
17. Солнечные данные 1985 г. Бюллетень № 12. — Л.: Наука, 1986 — 96 с.
18. Priklner K., Wagner V. // Studia geophysica geodaetica. 1983. V. 27. P. 173.
19. Titheridge J. E. // Planet. Space Sci. 1973. V. 21. P. 1775.

Научно-исследовательский радиофизический  
институт

Поступила в редакцию  
10 июля 1987 г.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE RESONANT STRUCTURE  
OF THE ATMOSPHERIC ELECTROMAGNETIC NOISE SPECTRUM  
AT SHORT-PERIOD GEOMAGNETIC PULSATIONS

*P. P. Belyaev, S. V. Polyakov, V. O. Rapoport, V. Yu. Trakhtengerts*

The paper presents the results of experimental investigation of the spectral structure of the regular noise background of horizontal components of a magnetic field in the 0.1–10 Hz range. A resonant structure of averaged spectra with regularly alternating minima and maxima having a frequency interval  $\Delta F \simeq 0.5 \pm 2.8$  Hz is revealed and studied in detail. The value  $\Delta F$  has a characteristic daily variation and is correlated with the daily variation of the critical frequency of the layer  $F$  at the observation point. The modulation depth of the spectrum amounts to 50%. Daily and season variations and the dependence of the resonant structure parameters on solar activity are studied. It is shown that the observed regular noise has a thunderstorm origin. The obtained results are readily explained by the influence of an ionospheric Alfvén resonator.

---