

УДК 550.383

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ СТРУКТУР С РАЗНЫМИ ЧАСТОТНЫМИ МАСШТАБАМИ В СПЕКТРЕ ФОНОВОГО КНЧ ШУМА НА СРЕДНИХ ШИРОТАХ

Е. Н. Ермакова, С. В. Поляков, Н. В. Семёнова

Научно-исследовательский радиофизический институт, г. Нижний Новгород, Россия

По данным непрерывного мониторинга низкочастотного фонового шума на станции «Новая жизнь» (Нижегородская область, Россия) за 2006–2010 годы исследована новая спектральная структура, проявляющаяся в квазигармонических осцилляциях интенсивности шума с частотными масштабами в 3–4 раза меньшими, чем масштабы обычной резонансной структуры спектра. Исследованы особенности тонкой структуры спектра: частота появления, суточная динамика, ширина частотного диапазона. Исследованы также особенности обычной резонансной структуры в периоды появления «тонкой структуры» и в переходный период солнечной активности (2010–2011 годы). По расчётам низкочастотных магнитных полей, распространяющихся в сферическом горизонтально неоднородном волноводе Земля–ионосфера, выполнен анализ возможного влияния нелокальных свойств ионосферы на спектры магнитных компонент в диапазоне 0,1–20 Гц. Показано, что влияние нелокальных свойств ионосферы на КНЧ спектры может проявиться при наличии горизонтальной неоднородности ионосферы, обусловленной разным характером профилей ионосферных параметров вдоль трассы распространения радиоволн.

ВВЕДЕНИЕ

Хорошо известно, что на спектры магнитного КНЧ шума оказывают влияние неоднородные ионосферные структуры, расположенные на высотах 80–1000 км (ионосферный альвеновский резонатор, ИАР) и на высотах 80–300 км (суб-ИАР). Влияние этих резонаторов приводит к появлению резонансной структуры спектра и широкополосного спектрального максимума, которые впервые были обнаружены на среднеширотном пункте «Новая жизнь» (55,97° с. ш., 45,74° в. д.) [1, 2]. Резонансная структура спектра проявляется в квазигармонической модуляции спектров параметров приземного магнитного шума, однако может иметь и более сложный вид [3]. Сложный вид спектров фонового магнитного шума на средних широтах связан и с обнаруженной недавно тонкой структурой, которая проявляется в осцилляциях интенсивности шума с частотными масштабами в 3–4 раза меньшими, чем масштабы обычной резонансной структуры [4, 5].

Впервые тонкая структура спектра была обнаружена на о. Крит, Греция (35,15° с. ш., 25,20° в. д.) и считалась особенностью спектров магнитного шума именно на этих широтах [6]. Настоящая работа посвящена исследованию морфологических свойств тонкой структуры спектра на средних широтах в период минимума солнечной активности и в период выхода из минимума (таким переходным периодом стали 2010–2011 годы). Также в работе исследованы изменения обычной резонансной структуры в переходный период.

На данный момент не существует адекватного механизма, объясняющего формирование тонкой структуры спектра в фоновом шуме на средних широтах. Объяснение существования резонансных структур с разным периодом осцилляций является важным, т. к. при развитии методов диагностики ионосферной плазмы, основанной на регистрации и изучении спектров магнитного шума в КНЧ диапазоне именно частотный масштаб осцилляций является ключевым параметром, по которому определяются профили электронной концентрации ионосферы над точкой приёма.

Е. Н. Ермакова, С. В. Поляков, Н. В. Семёнова

881

Поскольку появление осцилляций с малыми периодами, возможно, не связано с влиянием локального ионосферного альвеновского резонатора, в работе представлены результаты исследований возможного влияния неоднородных структур нелокальной ионосферы на спектры магнитного шума (локальной считается ионосфера с горизонтальными размерами $100 \div 150$ км над точкой приёма). В данной статье для расчётов будут использованы результаты решения задачи о возбуждении сферического горизонтально неоднородного волновода Земля—ионосфера источником типа вертикальный электрический диполь [7] и применена методика расчёта поверхностного импеданса анизотропной и неоднородной ионосферы, развитая в [2, 3, 8].

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

В работе приводятся результаты обработки данных по регистрации тангенциальных компонент магнитного фонового шума по оси север—юг ($H_{СЮ}$) и восток—запад ($H_{ВЗ}$) в среднеширотном пункте «Новая жизнь», Нижегородская область, Россия. Обработка заключалась в построении спектров на временном интервале с длительностью 10 с с последующим усреднением $80 \div 100$ спектральных реализаций, что соответствует усреднению за $15 \div 20$ мин. Анализ данных за 2006–2010 годы позволил исследовать основные морфологические свойства тонкой структуры спектра. Был выполнен статистический анализ вероятности появления этого явления на средних широтах — за 2007–2009 годы построена вероятность появления тонкой структуры спектра на среднеширотном пункте «Новая жизнь». Считалось, что тонкая структура существовала, если в спектре магнитных компонент фонового шума наблюдалось не менее 3 осцилляций с частотными масштабами в 3–4 раза меньшими, чем периоды обычной резонансной структуры. Такой критерий существования тонкой структуры можно считать корректным, т. к. при наблюдениях тонкой структуры обычная резонансная структура спектра существовала всегда.

На рис. 1 приведены примеры спектров магнитной компоненты $H_{СЮ}$, которые демонстрируют, что глубина осцилляций тонкой структуры может составлять $30 \div 40\%$. Основные особенности этого явления продемонстрированы на рис. 2. Графики демонстрируют динамику спектров тонкой структуры, которая, как правило, повторяет динамику обычной резонансной структуры спектра. Иногда тонкая структура может выглядеть как расщепление линий обычной резонансной структуры (рис. 2а), тогда наклон линий тонкой структуры на динамическом спектре может отличаться от наклона линий обычной резонансной структуры (рис. 2б).

На спектрограммах рис. 2 видно, что частотный диапазон, в котором регистрируются осцилляции с частотным интервалом $0,2 \div 0,3$ Гц, не превышает $3 \div 5$ Гц и существенно меньше, чем

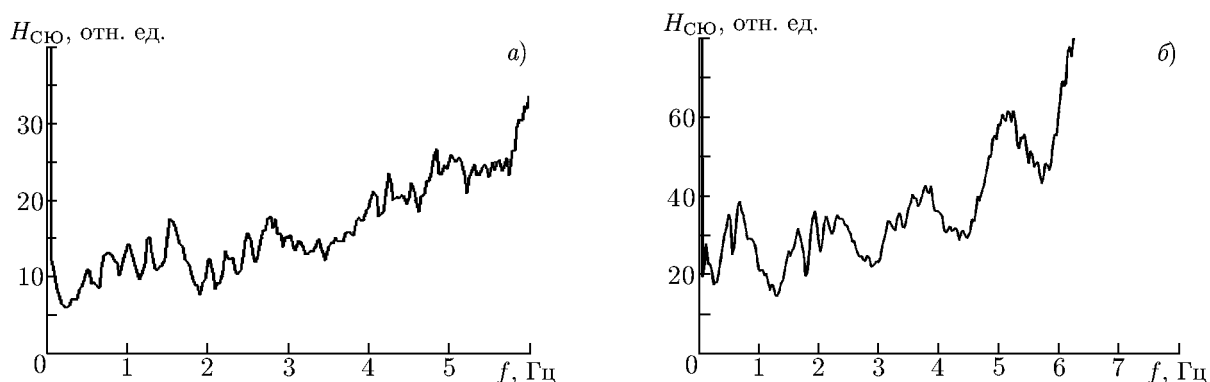


Рис. 1. Тонкая структура в магнитной компоненте $H_{СЮ}$ в 21:30 UT 26.10.2009 (а) и 00:00 UT 16.10.2009 (б)

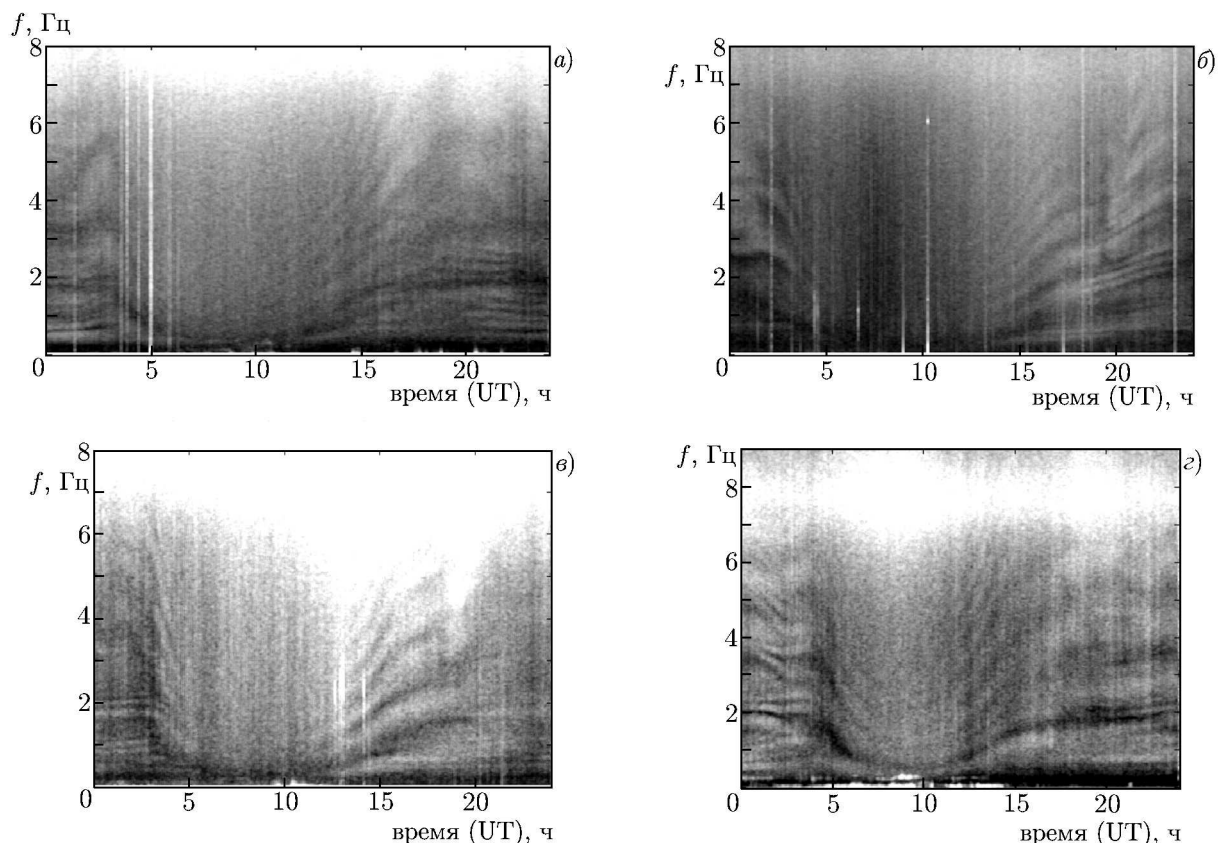


Рис. 2. Примеры тонкой структуры в спектре магнитных компонент $H_{СЮ}$, наблюдаемых в приёмном пункте «Новая жизнь». Панель *a* соответствует 26.10.2009, *б* — 23.09.2009, *в* — 16.10.2009, *з* — 11.12.2010. Здесь и далее более тёмные области соответствуют меньшей интенсивности

область частот, в которой одновременно обнаруживается обычная резонансная структура с периодами $1,2 \div 2,0$ Гц. Тонкая структура возникает в спектрах магнитных компонент шума только в тёмное время суток, как правило, через $3 \div 5$ часов после захода солнца в те временные интервалы, когда частотный период обычной резонансной структуры становится больше $1 \div 1,2$ Гц. (см. рис. 3). На рис. 3 видно, что тонкая структура возникала около полуночи или через $1,5 \div 2$ часа после неё по локальному времени и существовала не более 2 часов. В то же время обычная резонансная структура существовала в этот период на $5 \div 6$ часов дольше. Обнаружено, что вероятность появления этого явления максимальна в осенне-весенний период в годы минимума солнечной активности и достигает значений $25 \div 30\%$ в апреле и октябре (см. рис. 4). В другие сезоны частота появления тонкой структуры не превышала $10 \div 15\%$.

Наиболее ярко осцилляции с малым частотным периодом проявлялись только в одной из магнитных компонент (см. рис. 2), при этом в другой компоненте часто регистрировалась резонансная структура с неэквидистантными линиями (рис. 5а). В год выхода солнечной активности из минимума (2010 год) произошло резкое уменьшение числа событий появления тонкой структуры, и уже с апреля месяца ярко выраженные осцилляции с малым частотным масштабом не обнаруживались в магнитном шуме. Одновременно с этим традиционная резонансная структура приобрела форму правильных осцилляций (рис. 5б).

Но с октября 2010 года уровень солнечной активности уменьшился с $R12 = 25$ до $R12 = 15$ в декабре, и в декабре 2010 года было зарегистрировано 7 случаев появления тонкой структуры.

Одновременный анализ записей в приёмных пунктах «Новая жизнь» и «Ловозеро» (приёмный

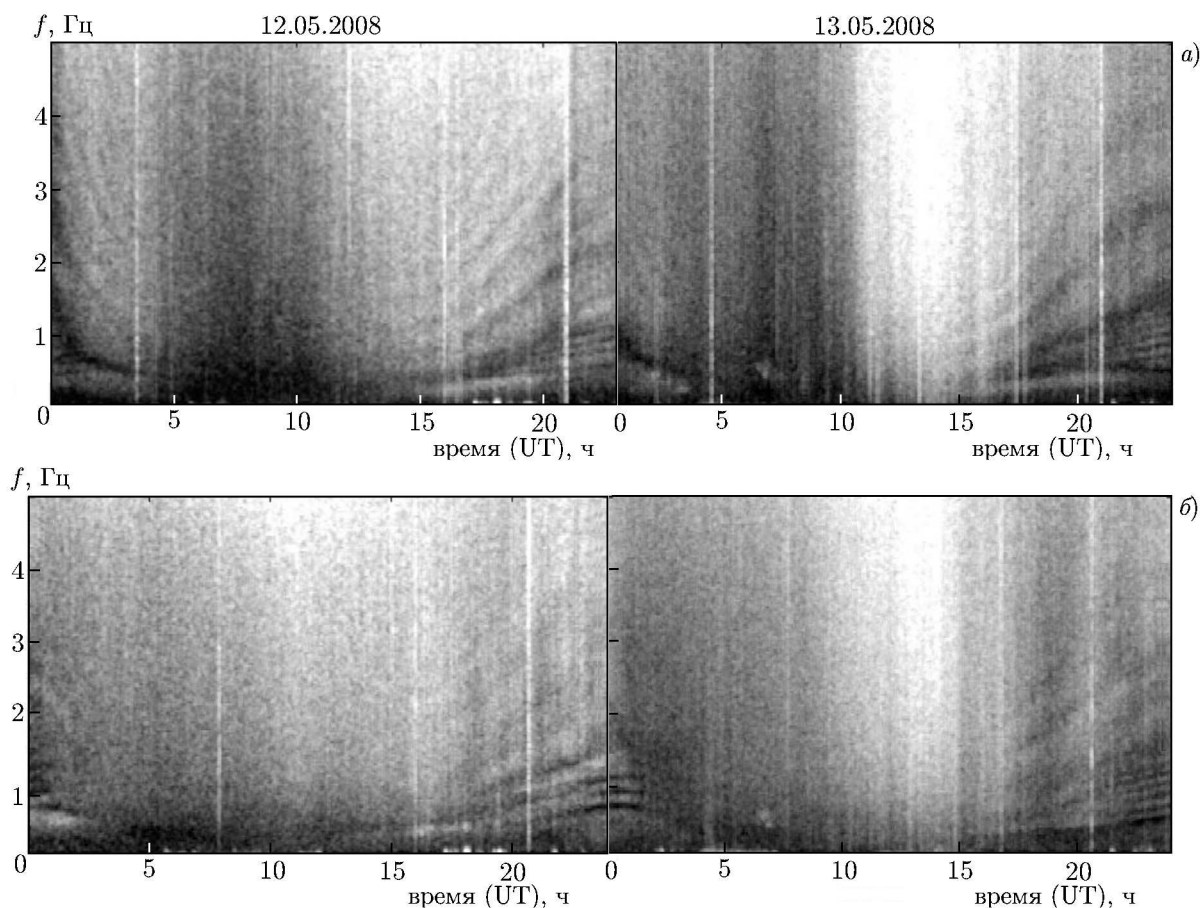


Рис. 3. Спектры тонкой структуры, демонстрирующие время возникновения и длительность существования тонкой структуры в приёмном пункте «Новая жизнь» 12–13.05.2008: *a* — компонента H_{V3} , *б* — компонента $H_{CЮ}$

пункт Полярного геофизического института, 68° с. ш., 35° в. д.) при спокойной геомагнитной обстановке показал, что тонкая структура была зарегистрирована только на станции «Новая жизнь» (см. рис. 6).

По сравнению с тонкой структурой, обнаруженной на о. Крит, тонкая структура на более высоких широтах имеет некоторые особенности: характерные частотные периоды структуры в 1,5–2 раза больше, чем на о. Крит, глубина осцилляций, напротив, существенно меньше (на 20÷30 %).

Для развития методов диагностики ионосферной плазмы, основанных на регистрации резонансных структур в магнитном КНЧ шуме, важно проанализировать изменение параметров резонансной структуры, связанной с ионосферным альвеновским резонатором локальной ионосферы, в разные периоды солнечной активности и в периоды существования тонкой структуры.

Можно выделить некоторые характерные изменения обычной резонансной структуры, которые наблюдаются при выходе активности Солнца из минимума (см. рис. 7):

1) сужение частотного диапазона, в котором существует это явление — для минимума солнечной активности верхняя граница частотного диапазона может простирается до второго шумановского резонанса;

2) уменьшение интервалов существования структуры в течение дня — в период минимума солнечной активности резонансная структура имеет временные «хвосты», т. е. может существовать

30÷40 мин до захода Солнца и более часа после его восхода. В год увеличения солнечной активности при $R12 > 40$ резонансная структура возникала только после захода Солнца и практически исчезала за 2 часа перед его восходом. Таким образом, можно утверждать, что с возрастанием активности Солнца перестаёт существовать ионосферный альвеновский резонатор в переходной области вблизи солнечного терминатора;

3) суточное изменение периодов осцилляции структуры при увеличении активности Солнца более плавное по сравнению с периодом минимума активности Солнца (см. рис. 8). Спектр магнитной компоненты на этом рисунке демонстрирует, что частотный период резонансных осцилляций в год возрастающей солнечной активности увеличивается в течение суток менее, чем в 2 раза, в год минимума активности — в 3 раза.

4) с увеличением солнечной активности резонансная структура приобретает форму эквидистантных осцилляций (см. рис. 5).

Таким образом, по результатам экспериментальных исследований можно сделать вывод, что обычная резонансная структура спектра, которая зарегистрирована в пункте «Новая Жизнь» в переходном периоде солнечной активности ($R12 > 40$) близка по некоторым свойствам тонкой структуре, которая наблюдалась на средних широтах в год минимума солнечной активности.

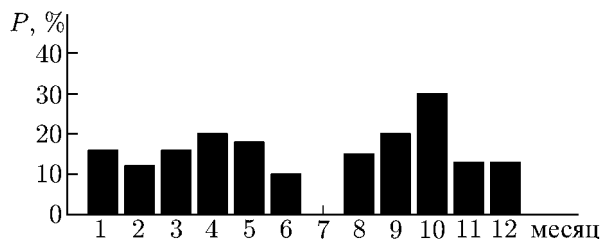


Рис. 4. Вероятность P появления тонкой структуры спектра на средних широтах по данным приёмного пункта «Новая жизнь» за 2007–2009 годы в зависимости от номера месяца

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЁТОВ

Поскольку механизм формирования тонкой структуры, рассмотренный в работе [6], не подходит для широт приёмного пункта «Новая жизнь», а частотный период наблюдаемой структуры существенно меньше, чем период в обычных резонансных структурах, связанных с влиянием локального ионосферного резонатора, мы исследуем возможность влияния параметров нелокальной ионосферы на спектры магнитных компонент шума. В данной статье мы будем использовать результаты решения задачи о вычислении магнитных компонент в сферическом горизонтально неоднородном волноводе Земля–ионосфера [7] и пользоваться методикой расчёта поверхностного

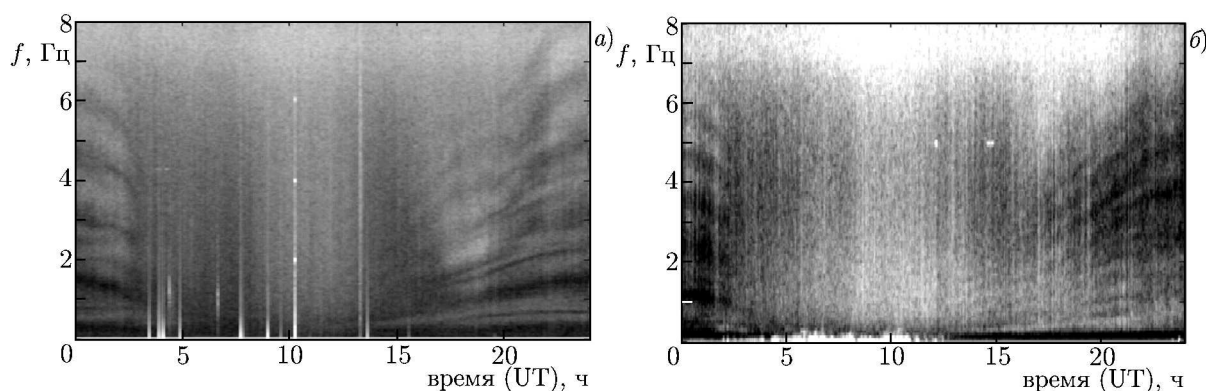


Рис. 5. Типичные спектрограммы резонансной структуры спектра в периоды разного уровня солнечной активности по данным Центра предсказания солнечной погоды (Space Weather Prediction Center), <http://www.swpc.noaa.gov>: 23.09.2009, число солнечных пятен $R12 \approx 0$ (a) и 21.09.2010, $R12 = 25$ (б)

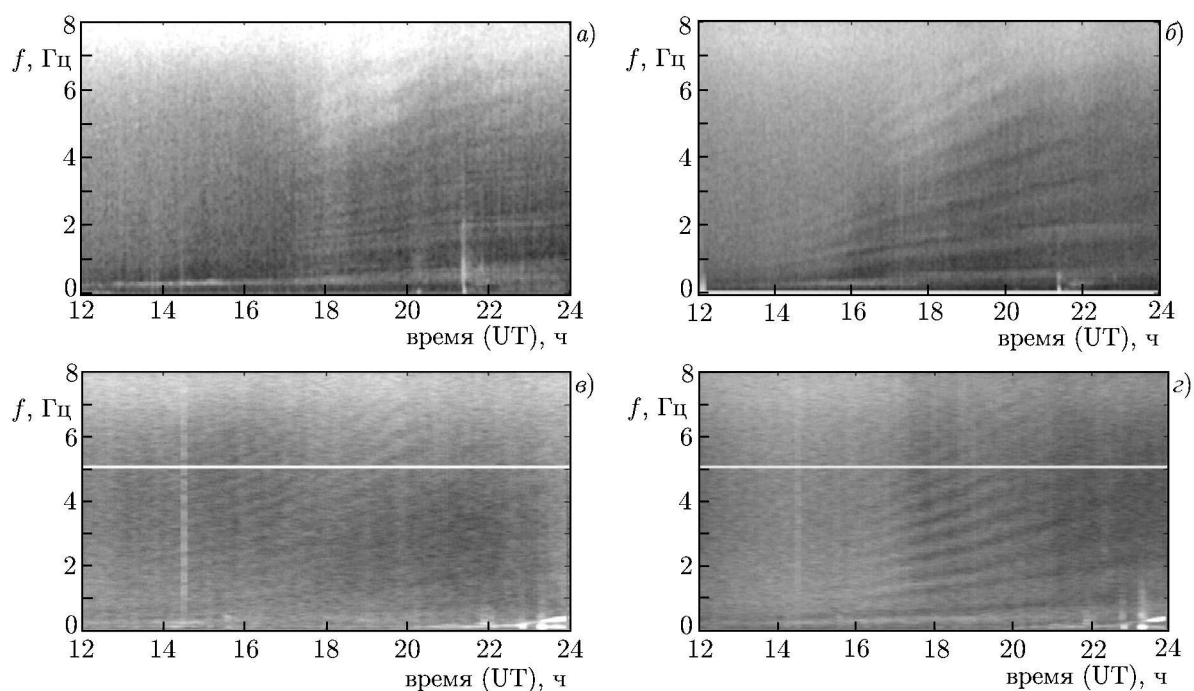


Рис. 6. Спектры магнитных компонент $H_{СЮ}$ (а, в) и $H_{ВЗ}$ (б, г) на станциях «Новая Жизнь» (а, б) и «Ловозеро» (в, г) 03.04.2006

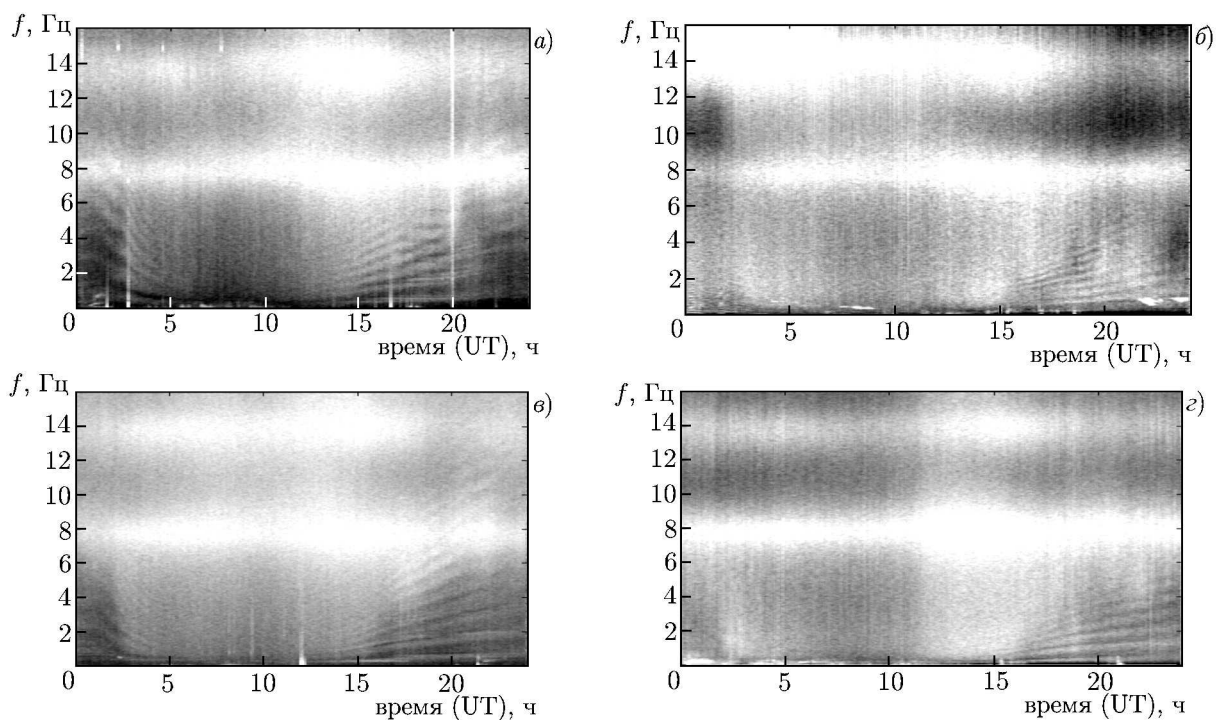


Рис. 7. Спектрограммы магнитной компоненты D , демонстрирующие параметры и динамику резонансной структуры в течение дня в период минимума солнечной активности (а, в) и в переходный период (б, г). Панель а соответствует 21.09.2009, б — 21.09.2011 ($R_{12} = 46$), в — 04.04.2006, г — 04.04.2011 ($R_{12} = 70$)

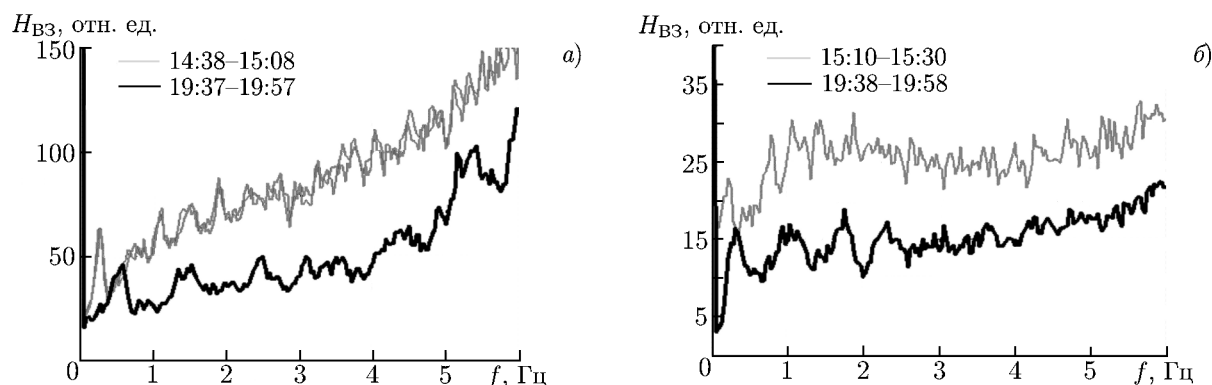


Рис. 8. Линейные спектры компоненты H_{VZ} , демонстрирующие изменения частотного периода осцилляций резонансной структуры в течение суток при разном уровне солнечной активности: 03.04.2006 (а) и 03.04.2011 (б)

импеданса анизотропной и неоднородной ионосферы, развитой в [8].

Как было показано в работе [7], тангенциальные магнитные компоненты поля вертикального электрического диполя в волноводе Земля–ионосфера вычисляются по формулам

$$\begin{aligned} H_{\varphi} &= \frac{Il_R \sqrt{D(h_S)}}{4\pi ah_C} \left[(\mathbf{h}_L^{-1})_{\theta\theta} + \frac{(\mathbf{h}_S)_{\theta\varphi}}{(\mathbf{h}_S)_{\theta\theta}} (\mathbf{h}_L^{-1})_{\theta\varphi} \right] \operatorname{ctg} \frac{r}{2a}; \\ H_{\theta} &= -\frac{Il_R \sqrt{D(h_S)}}{4\pi ah_C} \left[(\mathbf{h}_L^{-1})_{\varphi\theta} + \frac{(\mathbf{h}_S)_{\theta\varphi}}{(\mathbf{h}_S)_{\theta\theta}} (\mathbf{h}_L^{-1})_{\varphi\varphi} \right] \operatorname{ctg} \frac{r}{2a}. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь Il_R — токовый момент диполя, h_C — ёмкостная высота ионосферы в точке источника, a — радиус Земли, ϑ и φ — сферические координаты на поверхности Земли, ось ϑ — направлена вдоль геодезической линии, соединяющей источник и приёмник, r — расстояние между источником и приёмником вдоль геодезической линии. Матрица $\mathbf{h}_L$ задаётся выражением

$$\mathbf{h}_L = \frac{i}{k_0} (-ik_0 h \mathbf{J} - \mathbf{Z}), \quad (2)$$

где $\mathbf{J}$ — единичная матрица, $\mathbf{Z}$ — матрица поверхностного импеданса анизотропной неоднородной ионосферы. Матрица $\mathbf{Z}$ вычисляется по методике, развитой в [2, 3] и позволяющей отслеживать суточные и сезонные изменения ионосферных параметров, а также использовать любые ионосферные модели и проводить моделирование для реальных профилей ионосферы. Компоненты матрицы $\mathbf{h}_L$ вычисляются сначала в декартовой системе координат (x, y) , где ось x лежит в плоскости магнитного меридиана, а затем пересчитываются в системе координат (ϑ, φ) по формулам

$$\begin{aligned} h_{\theta\theta} &= h_{xx} \cos^2 \psi + h_{yy} \sin^2 \psi + (h_{xy} + h_{yx}) \sin \psi \cos \psi; \\ h_{\varphi\varphi} &= h_{yy} \cos^2 \psi + h_{xx} \sin^2 \psi - (h_{xy} + h_{yx}) \sin \psi \cos \psi; \\ h_{\theta\varphi} &= h_{xy} \cos^2 \psi - h_{yx} \sin^2 \psi - (h_{xx} - h_{yy}) \sin \psi \cos \psi; \\ h_{\varphi\theta} &= h_{yx} \cos^2 \psi - h_{xy} \sin^2 \psi - (h_{xx} + h_{yy}) \sin \psi \cos \psi, \end{aligned} \quad (3)$$

где ψ — угол поворота системы координат (ϑ, φ) относительно (x, y) . В выражениях (1) компоненты матрицы $\mathbf{h}_L^{-1}$ вычисляются в точке приёма, матрица $\mathbf{h}_S$ получается из матрицы $\mathbf{h}_L$ симметризацией и усреднением вдоль трассы распространения КНЧ радиоволн, $D(\mathbf{h}_S)$ — детерминант матрицы $\mathbf{h}_S$.

Ниже представлены результаты численных расчётов магнитных компонент КНЧ полей, возбуждаемых в горизонтально неоднородном волноводе наземным источником типа вертикальный

электрический диполь. На рис. 9 приведены результаты расчёта магнитной компоненты H_θ для плавно меняющихся вдоль волновода свойств ионосферы в ночное время по модели IRI-2007 [3], координаты приёмного пункта и источника 56° с. ш., 44° в. д. и 10° с. ш., 10° в. д. соответственно. Штриховая линия на рис. 9 соответствует однородному волноводу с параметрами ионосферы в точке приёма, штрих-пунктирная — волноводу с изменяющимся углом наклона магнитного поля вдоль трассы распространения радиоволн, сплошная — волноводу, в котором учтены изменения ионосферных параметров и угла наклона вдоль трассы. В случае, изображённом на рис. 9, показано, что влияние нелокальных свойств ионосферы, как правило, не изменяет существенно спектр фонового шума, который определяется свойствами ионосферы над точкой приёма.

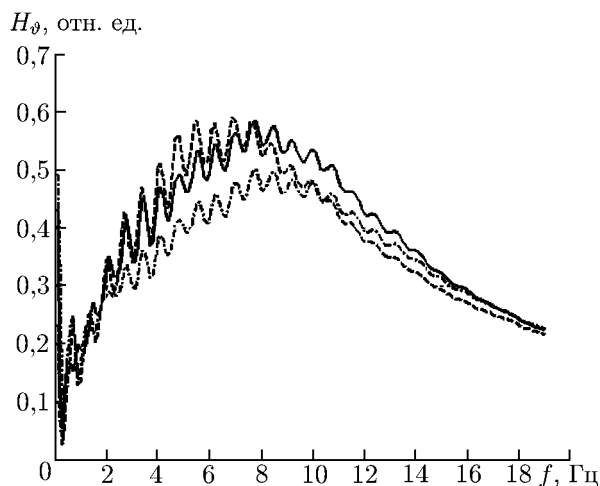


Рис. 9. Примеры расчёта тангенциальной компоненты H_θ для однородного и неоднородного волноводов для модели IRI-2007

для модельных профилей локальной ионосферы. Это связано с тем, что для описания профилей ионосферы на трассе мы выбираем параметры ионосферы в период, более близкий к прохождению солнечного терминатора, чем для локальной ионосферы.

Результаты моделирования представлены на рис. 10а. Также рассмотрен случай, когда нелокальная ионосфера частично задаётся более плавным профилем IRI-2007, и частично профилем, приводящим к осцилляциям с малым периодом Δf (рис. 10б). В подписи к рис. 10 приведены протяжённости трассы, соответствующие разным модельным профилям. Как показывает анализ, в формуле (1) определяющим является член с компонентами матрицы импеданса в точке приёма. Компоненты усреднённой матрицы, определяющей свойства ионосферы вдоль трассы распространения волн от источника к приёмнику существенно не меняют спектр, если спадание электронной концентрации на высотах выше максимума F -слоя задаётся моделью IRI-2007.

Если спадание ионосферных параметров на трассе более резкое, чем над точкой приёма, то увеличивается глубина осцилляций резонансной структуры, которая вызвана ионосферным альвеновским резонатором в нелокальной ионосфере (на трассе), и эти осцилляции могут проявиться и в спектрах в точке приёма.

Результаты численных расчётов указывают на принципиальную возможность влияния параметров нелокальной ионосферы на спектры магнитного шума. Но это влияние может быть заметным лишь при наличии очень протяжённой области ионосферы (вдоль трассы более $1\,000 \div 1\,500$ км) с более резким, чем в приёмном пункте, спаданием электронной концентрации на высотах выше максимума F -слоя. Кроме того, влияние нелокальной ионосферы для экваториаль-

Это подтверждает возможность развития методов диагностики ионосферы по измерениям естественных КНЧ полей. Для расчётов компонент матрицы поверхностного импеданса ионосферы в другом случае мы будем использовать модель IRI-2007 для описания профилей ионосферных параметров над точкой приёма (локальная ионосфера) и модель электронной концентрации, задаваемую аналитической α -функцией Чепмена [9] для более низкой широты (35° с. ш.) в послезаходные часы для описания нелокальных свойств ионосферы вдоль трассы распространения радиоволн. При моделировании спектров магнитных компонент для однородного волновода с использованием последнего модельного профиля резонансные осцилляции в спектрах магнитного поля будут иметь частотный масштаб Δf в 3–4 раза меньший, чем период осцилляций

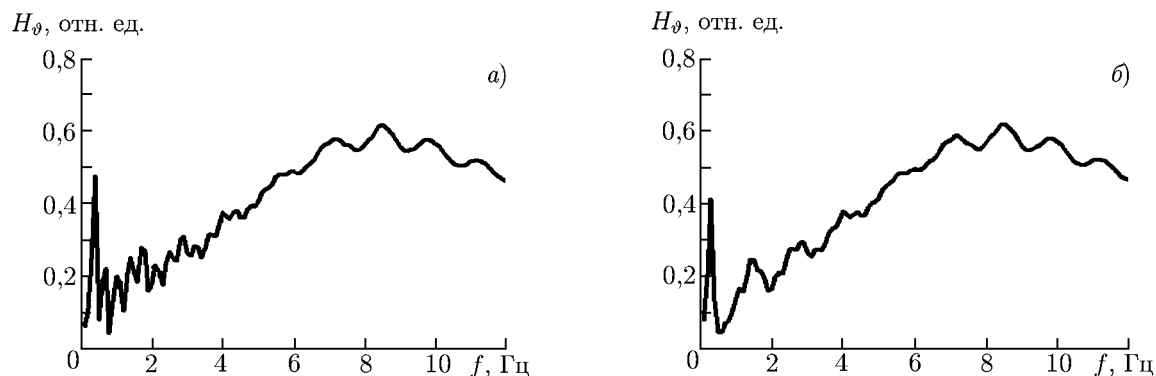


Рис. 10. Примеры моделирования магнитной компоненты H_θ для горизонтально неоднородного волновода Земля–ионосфера для разных моделей для профилей ионосферных параметров. Протяжённости трассы, на которой параметры ионосферы задаются α -функцией Чепмена — 4500 км (а) и 1000 км (б); трассы, на которой параметры задаются моделью IRI-2007 — 1000 км (а) и 4500 км (б)

ных источников не объясняет обнаружения тонкой структуры только в одном из наблюдательных пунктов («Новая Жизнь», «Ловозеро»), т. к. трасса распространения низкочастотных полей для сильно удалённых источников (расстояние до источника много больше расстояния между этими приёмными пунктами) для этих приёмных станций практически одна и та же.

ВЫВОДЫ

Из приведённых выше результатов экспериментальных исследований следует:

- 1) тонкая структура в спектре фоновых КНЧ шума наблюдается на станции «Новая жизнь» в период минимума солнечной активности, как правило, в периоды существования сложной резонансной структуры спектра (дополнительные максимумы, неэквидистантность резонансных линий);
- 2) частотный диапазон, в котором наблюдается тонкая структура, наиболее широк в осенне-весенний период и существенно уже, чем частотный диапазон, в котором регистрируется обычная резонансная структура. Тонкая структура, как правило, возникает с задержкой по отношению к обычной резонансной структуре на 3–4 часа;
- 3) обычная резонансная структура спектра испытывает ряд существенных изменений при выходе солнечной активности из минимума;
- 4) механизм образования тонкой структуры, связанный с влиянием свойств нелокальной ионосферы на спектры магнитных полей, не может объяснить все особенности этого явления на средних широтах.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 11-02-97104 р_поволжье_а, 11-02-97101 р_поволжье_а, 11-02-00419-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляев П. П., Поляков С. В., Рапопорт В. О., Трахтенгерц В. Ю. // Докл. АН СССР. 1987. Т. 297. С. 840.
2. Ермакова Е. Н., Котик Д. С., Поляков С. В., Щенников А. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 7. С. 607.

3. Ермакова Е. Н., Котик Д. С., Поляков С. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2008. Т. 51, № 7. С. 575.
4. Ermakova E. N., Polyakov S. V., Kotik D. S. // Abstracts of XXXIII Annual Seminar "Physics of Auroral Phenomena", 2–5 March 2010. P. 55.
5. Ермакова Е. Н., Поляков С. В., Семёнова Н. В. // Proc XXXIV Annual Seminar, Apatity, 2011. P. 147.
6. Böisinger T., Demekhov A. G., Trakhtengerts V. Yu. // Geophys. Res. Lett. 2004. V. 31. Art. no. L18802.
7. Кириллов В. В., Копейкин В. Н. // Изв. вузов. Радиофизика. 2002. Т. 45, № 12. С. 1011.
8. Böisinger T., Ermakova E. N., Haldoupis C., Kotik D. S. // Ann. Geophys. 2009. V. 27. P. 1313.
9. Ермакова Е. Н., Поляков С. В., Котик Д. С. // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 9–10. С. 621.

Поступила в редакцию 8 декабря 2011 г.; принята в печать 27 декабря 2011 г.

A STUDY OF RESONANT STRUCTURES WITH DIFFERENT FREQUENCY SCALES IN THE SPECTRUM OF BACKGROUND EXTREMELY LOW-FREQUENCY NOISE AT MIDDLE LATITUDES

E. N. Ermakova, S. V. Polyakov, and N. V. Semyonova

Using the data of continuous monitoring of low-frequency background noise at the station "Novaya Zhizn" (Nizhny Novgorod Province, Russia) for 2006–2010, we studied a new spectral structure appearing in quasi-harmonic oscillations of the noise intensity with the frequency scales which are a factor of 3–4 smaller than the scales of an ordinary spectral resonant structure. The features of the fine spectral structure were studied, i.e., frequency of occurrence, diurnal dynamics, and the frequency range width. The features of an ordinary resonant structure were also studied in the "fine structure" appearance and the solar-activity periods (2010–2011). Using the calculations of the low-frequency magnetic fields propagating in a spherically horizontally inhomogeneous waveguide Earth–ionosphere, we analyzed the possible influence of the nonlocal ionospheric properties on the magnetic-component spectra in the range 0.1–20 Hz. It is shown that the influence of the ionospheric nonlocal properties on the extremely low-frequency spectra can be observed in the presence of an ionospheric horizontal inhomogeneity due to different natures of the ionospheric-parameter profiles along the radio-wave propagation path.