

УДК 550.383

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ГРОЗОВЫХ ОЧАГОВ НА СПЕКТРЫ ПАРАМЕТРОВ ФОНОВОГО УНЧ МАГНИТНОГО ШУМА

Е. Н. Ермакова^{1*}, Д. С. Котик¹, А. В. Рябов¹, А. А. Панютин²

¹ Научно-исследовательский радиофизический институт;

² Верхне-Волжское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды,
г. Нижний Новгород, Россия

В работе исследовано влияние маскирующего фактора от локальных грозových очагов на спектры УНЧ магнитных полей при существовании неоднородных структур электронной концентрации в локальной ионосфере (ионосферный и нижний ионосферный альвеновские резонаторы). На основе оригинальной методики обработки данных регистрации горизонтальных магнитных компонент на среднеширотном приёмном пункте «Новая Жизнь» исследован вклад источников, удалённых на различные расстояния от приёмного пункта, в формирование спектров фонового шума. Использовалась методика обработки УНЧ сигналов, позволяющая уменьшить импульсную составляющую магнитного шума выше некоторого порога по амплитуде и тем самым исключить влияние локальной грозовой активности. Анализируются также частотные зависимости азимутального угла главной оси эллипса поляризации магнитного шума. Показано, что наличие нижнего ионосферного альвеновского резонатора приводит к немонотонной зависимости азимутального угла от частоты. Обнаружено, что локальные грозы, находящиеся ближе 60÷80 км от приёмного пункта, полностью маскируют проявление нижнего ионосферного альвеновского резонатора в поляризационных параметрах УНЧ шума. Для определения положения локальных грозových очагов привлекались данные с метеорологического радиолокационного комплекса МРЛ-5, расположенного в Нижнем Новгороде.

ВВЕДЕНИЕ

В работе исследуются особенности спектров магнитного шума в диапазоне 0,1÷15 Гц при наличии локальных грозových очагов, расположенных в радиусе до 200÷250 км от приёмного пункта.

Известно, что на формирование спектров фонового шума от дальних грозových очагов существенно влияют неоднородные ионосферные структуры электронной концентрации — ионосферный альвеновский резонатор (ИАР) и нижний ионосферный альвеновский резонатор на высотах от 80 до 300 км (суб-ИАР) [1–3]. При исследовании возбуждения структуры суб-ИАР региональными источниками гроз основное внимание уделяется изучению частотных зависимостей степени круговой поляризации магнитного шума, т. к. этот параметр наиболее адекватно описывает влияние этой ионосферной структуры на спектральные особенности УНЧ полей. В работе [4] на основе теоретических расчётов показано, что основные характеристики частотной зависимости параметра ϵ не зависят от направления на источник и определяются параметрами локальной ионосферы. Наличие суб-ИАР приводит к характерным вариациям в частотной зависимости параметра ϵ .

С уменьшением расстояния от приёмного пункта до грозových разрядов, являющихся источником низкочастотных полей, влияние ионосферы на спектры магнитных полей уменьшается, т. к. сильно возрастает прямой (не отражённый от ионосферы) сигнал, приходящий в точку приёма. Поэтому ближние грозы могут менять не только амплитудные спектры шума, но и поляризацию низкочастотного излучения. Изменения частотных зависимостей поляризации, связанные с усилением локальных грозových очагов, важно отделять в диагностических целях от изменений поляризации, связанных с вариациями ионосферных параметров.

* l.ermakova@nirfi.sci-nnov.ru

Также в работе обнаружено и проанализировано влияние структуры суб-ИАР на частотную зависимость азимутального угла эллипса поляризации магнитного шума. Показано, что локальные грозовые источники могут изменять частотный спектр поляризации, уменьшать степень круговой поляризации УНЧ излучения и сглаживать немонопотонную зависимость от частоты пространственной ориентации эллипса поляризации. Помимо этого, были проанализированы амплитудные спектры магнитных компонент до и после процедуры ограничения сверху амплитуды сигнала для исследования вклада локальных грозовых очагов в формирование резонансной структуры, связанной с влиянием ИАР. С помощью данных метеорадара были определены расстояния до грозовых источников, на которых наблюдалась полная маскировка влияния неоднородной структуры суб-ИАР на частотные зависимости поляризации и азимутального угла.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

В работе приводятся результаты обработки данных по регистрации горизонтальных компонент магнитного фонового шума $H_{СЮ}$ (вдоль направления север—юг) и $H_{ВЗ}$ (вдоль направления

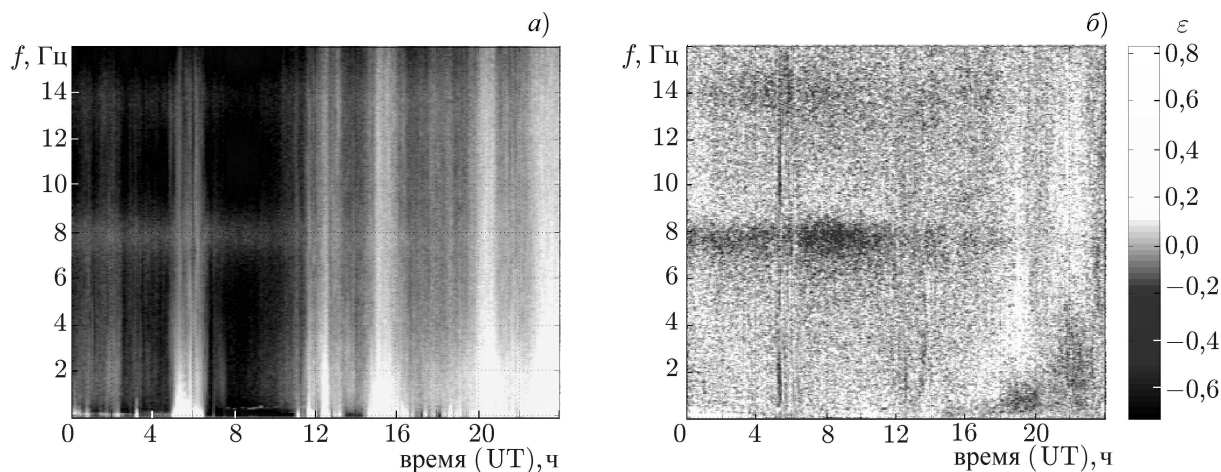


Рис. 1. Динамические спектры магнитной компоненты $H_{ВЗ}$ (а) и поляризационного параметра ε (б) за 05.07.2011. Здесь и далее светлые участки соответствуют большей спектральной амплитуде магнитной компоненты

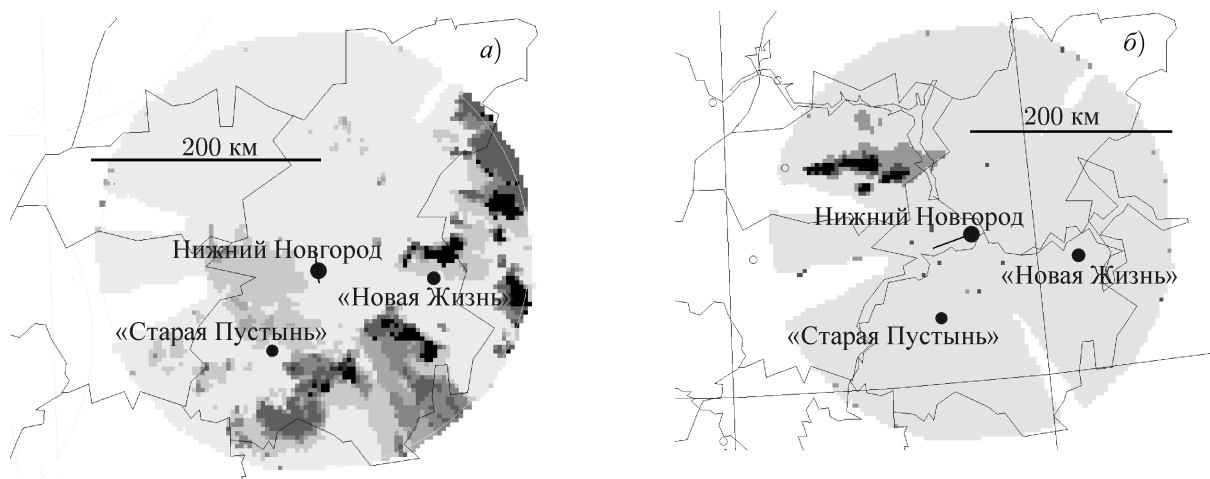


Рис. 2. Карты метеорадара в 20:00 UT 05.07.2011 (а) и 19:00 UT 01.08.2010 (б). Чёрный цвет соответствует областям с развитой локальной грозовой активностью

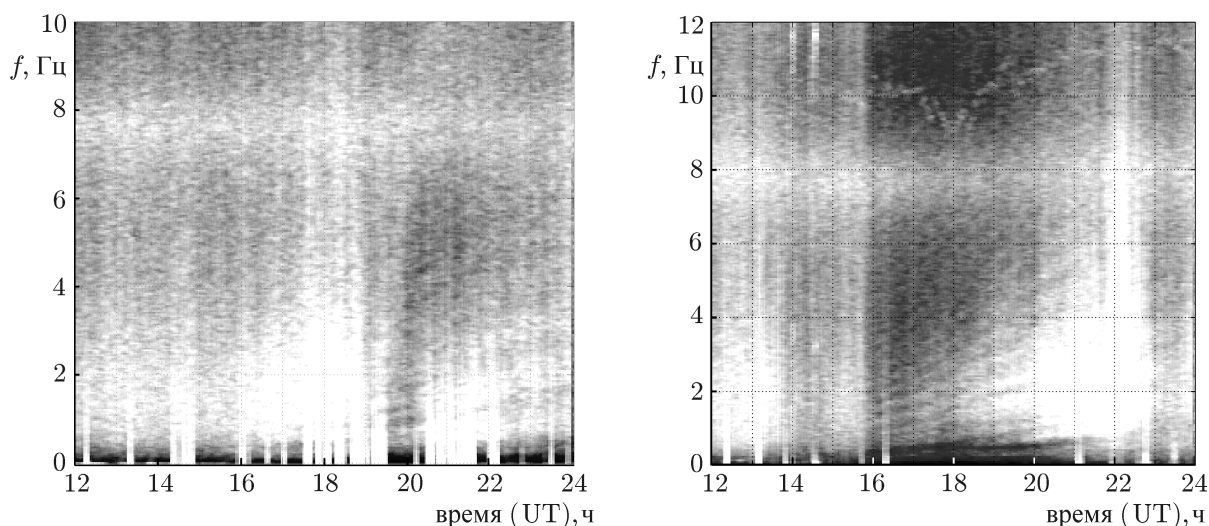


Рис. 3. Спектрограммы магнитных компонент в приёмном пункте «Новая Жизнь», демонстрирующие наличие локальной грозовой активности 01.08.2010 ($H_{C\gamma}$; а) и 02.08.2010 (H_{Bz} ; б)

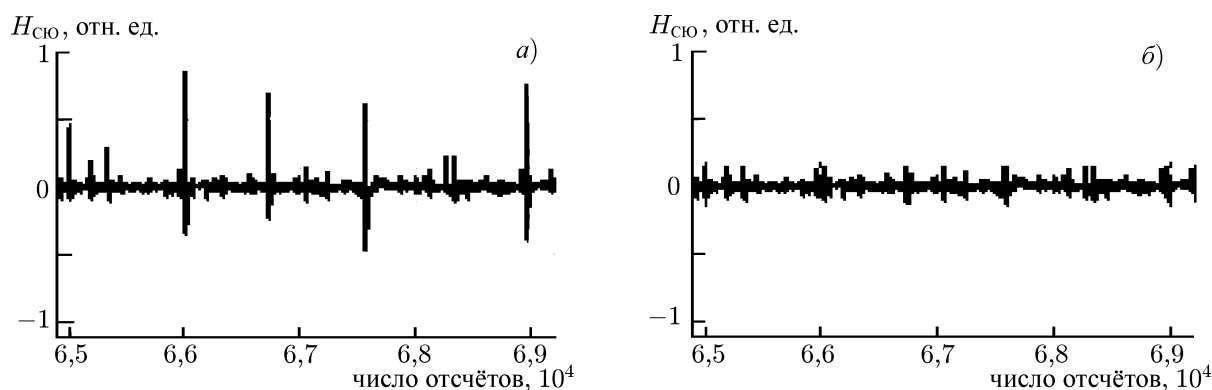


Рис. 4. Временные реализации магнитной компоненты $H_{C\gamma}$ в приёмном пункте «Новая Жизнь» до (а) и после (б) процедуры ограничения сигнала по амплитуде за период 22:03–22:06 UT 02.08.2010

восток—запад) в среднеширотном пункте «Новая Жизнь» (Нижегородская область, Россия) в период повышенной региональной грозовой активности. Частотные зависимости строились на временном интервале 10 с с последующим усреднением по $80 \div 100$ спектральным реализациям, что соответствовало усреднению по $15 \div 20$ мин. Анализировались спектры амплитуды магнитных компонент и частотные зависимости поляризационного параметра (степени круговой поляризации)

$$\varepsilon = \frac{|H_R(f)| - |H_L(f)|}{|H_R(f)| + |H_L(f)|}. \quad (1)$$

Здесь $|H_R(f)|$ и $|H_L(f)|$ — спектры амплитуды право- и левополяризованных компонент H_R и H_L , $H_R = H_{C\gamma} + iH_{Bz}$, $H_L = H_{C\gamma} - iH_{Bz}$, $H_{C\gamma}$ и H_{Bz} — компоненты магнитного шума, которые измерялись экспериментально.

На рис. 1 приведены суточные спектрограммы магнитной компоненты H_{Bz} и поляризационного параметра ε за 05.07.2011. Сравнительный анализ этих спектрограмм позволяет сделать вывод, что при увеличении локальной грозовой активности (на спектрограмме амплитуды это проявляется в виде вертикальных более светлых полос) параметр ε в ночное время приближается к нулю, при этом знак ε не зависит от частоты.

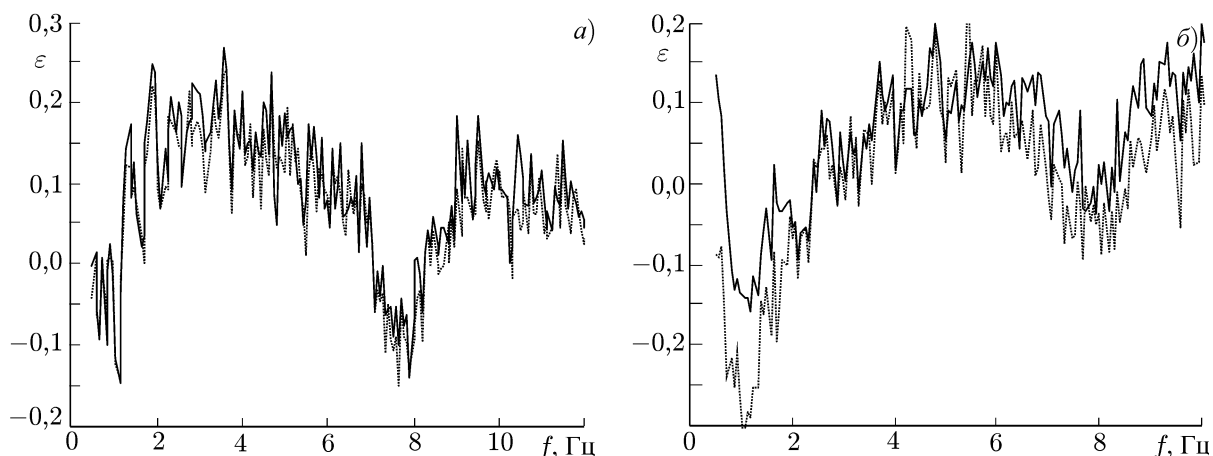


Рис. 5. Частотные зависимости поляризационного параметра ε в приёмном пункте «Новая Жизнь» в периоды действия локальных грозовых очагов в 19:00 UT 01.08.2010 (а) и 22:00 UT 02.08.2010 (б). Сплошные кривые соответствуют частотным зависимостям без ограничения сигнала по амплитуде, пунктирные — зависимостям после обработки

При анализе данных метеорологического радиолокационного комплекса МРЛ-5, имеющего радиус действия порядка 200 км, обнаружена повышенная локальная грозовая активность в этот период на территории Нижегородской области. В том числе источники гроз были обнаружены в непосредственной близости (40÷50 км) от приёмного пункта «Новая Жизнь» (см. рис. 2а).

Далее анализировались данные магнитометров за период существования грозовых очагов на территории Нижегородской области, которые имели меньшие пространственные размеры. Низкочастотные данные, демонстрирующие эти события за период с 18:00 до 19:00 UT 01.08.2010 и около 22:00 UT 02.08.2011, приведены на рис. 3

При обработке данных магнитометров использовался следующий оригинальный метод: задавался определённый порог отношения амплитуды импульсной составляющей шума к её максимальному значению, при превышении которого эта составляющая заменялась «белым» шумом с амплитудой, не превышающей порога (от 0,1 до 0,9). Далее проводился сравнительный анализ вновь полученных и первичных спектров при разных порогах. По глубине осцилляций резонансных частотных структур в этих спектрах мощности делался вывод о вкладе источников, расположенных на различных расстояниях от приёмного пункта, в формирование этих структур.

На рис. 4 приведены примеры временных реализаций одной из магнитных компонент низкочастотного шума в период повышенной региональной грозовой активности до (рис. 4а) и после (рис. 4б) процедуры ограничения сигнала по амплитуде. Региональная грозовая активность демонстрируется наличием импульсной составляющей, в 6÷8 раз превышающей уровень шума, создаваемого дальними грозовыми очагами.

Предложенная обработка УНЧ сигнала позволяет существенно уменьшить импульсную составляющую магнитного шума выше некоторого порога и тем самым исключить влияние локальной грозовой активности (см. рис. 4б). На рис. 5а приведены частотные зависимости поляризации фонового магнитного шума в период действия локальных грозовых очагов, расположенных на расстоянии около 200 км от приёмного пункта. Такие расстояния подтверждаются картой радарного зондирования, изображённой на рис. 2б. Сплошная кривая на рис. 5 соответствует частотной зависимости параметра ε без ограничения сигнала по амплитуде, пунктирная — частотной зависимости после обработки. Наблюдается хорошее совпадение обеих спектральных кривых на рис. 5а; это свидетельствует о том, что локальные грозовые очаги не меняют существенно частотную зависимость поляризации. Следовательно, локальные грозовые очаги вносят такой же вклад в

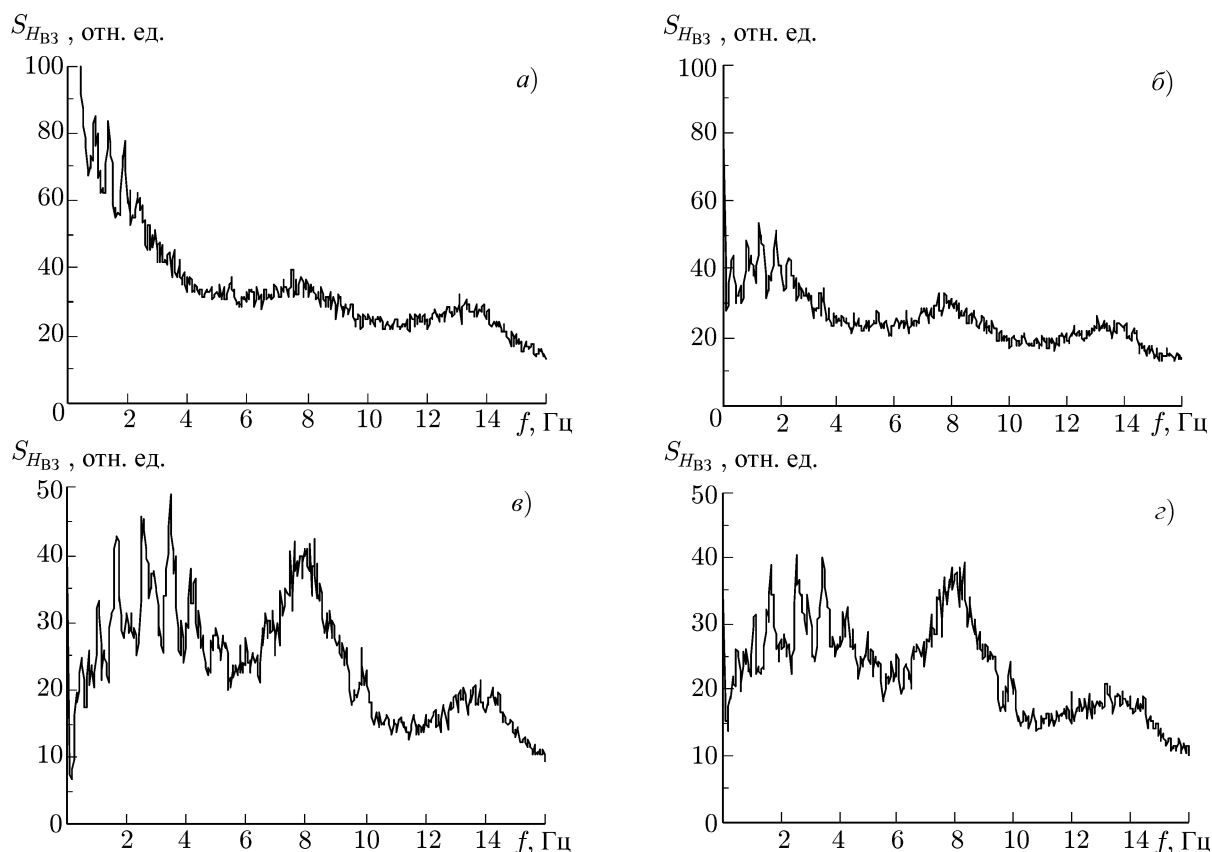


Рис. 6. Спектры амплитуды для компоненты H_{B3} в приёмном пункте «Новая Жизнь» до (а, в) и после (б, г) процедуры ограничения сигнала по амплитуде при наличии локальных грозowych источников на расстоянии меньше 200 км 18:03–18:23 UT 01.08.2010 (а, б) и в период отсутствия ярко выраженной локальной грозовой активности 20:51–22:11 UT 13.08.2010 (в, г)

формирование немоного спектра ε , характерного для влияния структуры суб-ИАР, как и удалённые очаги.

На рис. 5б представлен случай наличия локальных грозowych очагов, которые оказывают маскирующий эффект на частотную зависимость параметра ε : зависимость после ограничения сигнала по амплитуде обнаруживает более высокую степень круговой поляризации УНЧ шума (бóльшие абсолютные значения величины ε на частотах ниже 2 Гц). К сожалению, МРЛ-комплекс, расположенный в Нижнем Новгороде, не обнаружил в зоне своего действия с радиусом в 200 км локальных грозowych ячеек.

Для анализа влияния локальных грозowych очагов на формирование резонансной структуры спектра (РСС) были построены амплитудные спектры одной из магнитных компонент с ограничением сигнала по амплитуде. Результаты этого построения приведены на рис. 6. Рисунки 6а, б соответствуют спектрам в период развитой региональной активности. О развитой активности свидетельствуют и вид спектра (резкий подъём спектральной амплитуды на частотах ниже первого шумановского резонанса), и данные метеорологического радарного комплекса, регистрирующие грозowych ячейки в районе Горьковского водохранилища (см. рис. 2б).

После ограничения сигнала по амплитуде (см. рис. 6б) спектр магнитной компоненты существенно меняет вид: резко уменьшается спектральная амплитуда (почти в 2 раза на частотах ниже 4 Гц), при этом глубина резонансных осцилляций уменьшается в 1,2÷1,3 раза. Таким образом, исключив влияние ближних грозowych очагов, мы получили резонансную структуру с большей

относительной глубиной осцилляций, т.е. можно сделать вывод, что локальные грозовые очаги на таких расстояниях лишь частично маскируют влияние ИАР на амплитудные спектры шума. Для сравнения на рис. 6в, г приведены спектры в период, когда на территории Нижегородской области отсутствовала ярко выраженная грозовая активность (по данным радарного комплекса). В этом случае при ограничении импульсной составляющей мы получили пропорциональное уменьшение амплитуды магнитной компоненты на частотах ниже шумановского резонанса и абсолютной глубины осцилляций. Таким образом, относительная глубина резонансных осцилляций практически не изменилась после ограничения сигнала по амплитуде, т.е. источники, влияние которых мы исключили, вносили такой же вклад в формирование резонансной структуры, как и более далёкие источники. Из рис. 6в, г также видно, что после обработки спектральная амплитуда спектров на частотах шумановских резонансов практически не изменилась, что говорит о региональном характере грозовых источников, влияние которых было существенно уменьшено. Такие источники расположены на расстояниях до 1 000 км и не вносят существенного вклада в формирование шумановского резонанса.

Использованный метод обработки низкочастотных сигналов может существенно искажать спектры шума. Поэтому мы тщательно анализировали временные реализации и частотные зависимости параметров шума до и после ограничения сигнала по амплитуде. Существенные искажения спектров, связанные именно с обработкой, наблюдались, например, при малом периоде следования импульсов при наличии одновременно нескольких грозовых очагов в Нижегородской области (см. рис. 2а и рис. 7а).

Было обнаружено, что ограничение сигнала по амплитуде и замена импульсов на белый шум привели в этом случае к относительному увеличению спектральной амплитуды магнитного шума на частотах ниже 2 Гц (см. рис. 7б), хотя компенсация импульсов, связанных с близкими грозовыми ячейками, должна была бы привести к относительному уменьшению спектральных амплитуд на низких частотах (как и в случае, изображённом на рис. 6а, б). К такому искажению спектров привела замена большого числа импульсов на белый шум, т.е. в этом случае мы не смогли применить указанный метод обработки.

Для анализа возможностей метода выбиралось время, когда по данным метеорадара существовали единичные грозовые очаги на расстояниях от приёмной станции, превышающих $100 \div 120$ км (рис. 2б), или когда периоды следования импульсов были существенно длиннее $3 \div 5$ с (см. рис. 7в). Критерием допустимых искажений при такой обработке служило отсутствие увеличения спектральной амплитуды на низких частотах (менее 2 Гц) и отсутствие уменьшения абсолютной величины параметра ε (рис. 7г). Как следует из приведённых результатов, нам удалось зафиксировать, наоборот, увеличение глубины вариаций этого параметра по частоте после ограничения сигнала по амплитуде (рис. 5б). Таким образом, искажения от обработки были существенно меньше, чем выигрыш от компенсации влияния локальных гроз.

Один из основных результатов метода ограничения сигнала по амплитуде демонстрируется на рис. 5а и рис. 6а, б: компенсация импульсной составляющей шума существенно изменила характер спектра мощности магнитной компоненты и практически не изменила частотную зависимость поляризационного параметра ε . Таким образом, при наличии локальных грозовых очагов в спектрах мощности полностью маскируется влияние ионосферной структуры суб-ИАР, в то время как в поляризационном параметре маскировка этой структуры локальными грозами (расстояния от приёмного пункта более $100 \div 120$ км) менее заметна. Указанный метод обработки был выбран нами ещё и потому, что после компенсации импульсной составляющей (см. рис. 6в, г) шумовая компонента вносила существенный вклад в формирование резонансной структуры в спектре мощности магнитных компонент. Эти исследования были частично инициированы работой [5], в которой импульсной составляющей отводилась преимущественная роль в формировании резонансной структуры.

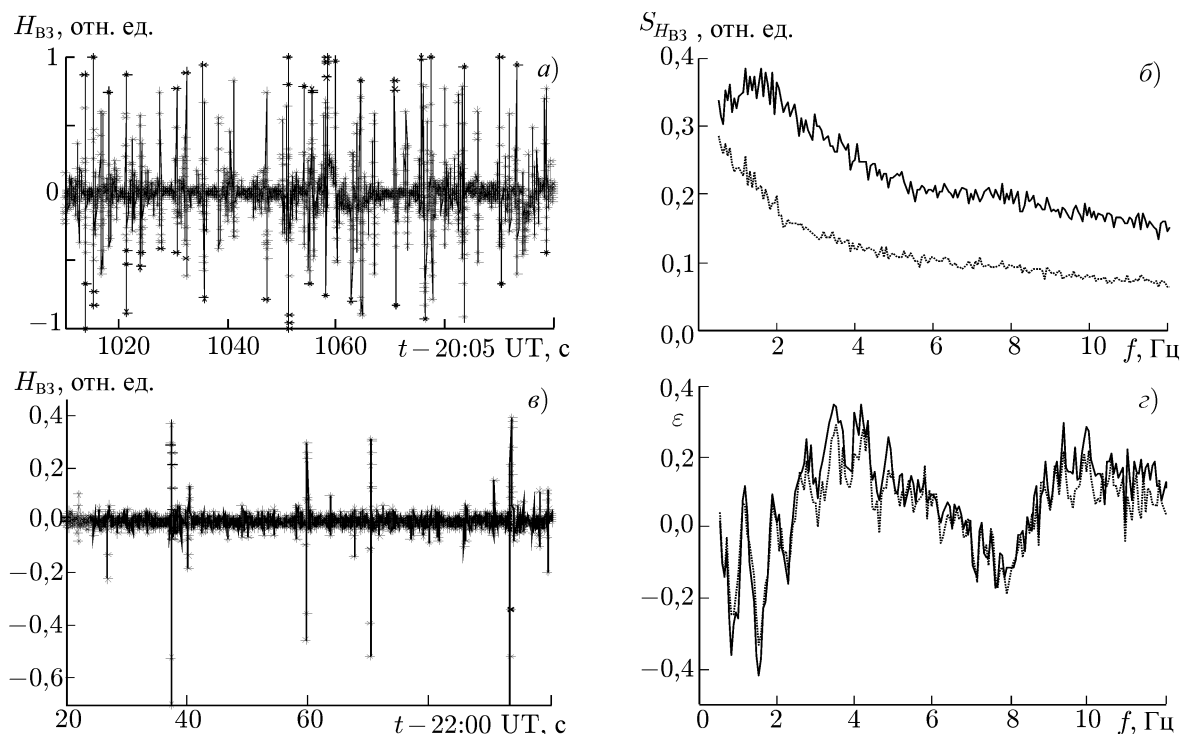


Рис. 7. Временные реализации компоненты H_{V3} для разных периодов локальных гроз (панель a — 20:05 UT 05.07.2011, панель c — 22:00 UT 02.08.2010) и её спектры до (сплошная линия) и после (пунктирная) ограничения сигнала по амплитуде для 20:00 UT 05.07.2011 (b), частотные зависимости поляризационного параметра ε до (сплошная линия) и после (пунктирная) ограничения сигнала по амплитуде для 20:50 UT 13.08.2010 (d)

нансной частотной структуры в спектре мощности. Также надо отметить, что использованный метод обработки в рассмотренных случаях не исказил основные параметры спектральных структур (частотных масштабов и граничной частоты), которые определяются локальными свойствами ионосферы.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРЫ СУБ-ИАР НА ПРОСТРАНСТВЕННУЮ ОРИЕНТАЦИЮ ЭЛЛИПСА ПОЛЯРИЗАЦИИ МАГНИТНОГО ШУМА

При исследовании локальной грозовой активности полезно построить и исследовать частотные зависимости азимутального угла большой оси эллипса поляризации, который зависит от направления прихода излучения в точку регистрации низкочастотных полей. Известно, что при распространении УНЧ волн в полости Земля—ионосфера основной модой являются волны с ТМ-поляризацией [6]. Однако гиротропия ионосферной среды приводит к трансформации ТМ-волн в ТЕ-волны [7]. Этот эффект наиболее ярко выражен в ночное время и приводит к росту продольной (вдоль направления распространения) компоненты магнитного поля, что делает невозможным определение направления на источник по восстановлению перпендикуляра к вектору магнитного поля.

В работах [3, 4] показано, что именно наличие резонансной полости суб-ИАР порождает к более резкое возрастание продольной компоненты УНЧ поля, а также частотную зависимость сдвига фаз между горизонтальными магнитными компонентами, что существенно меняет частотную

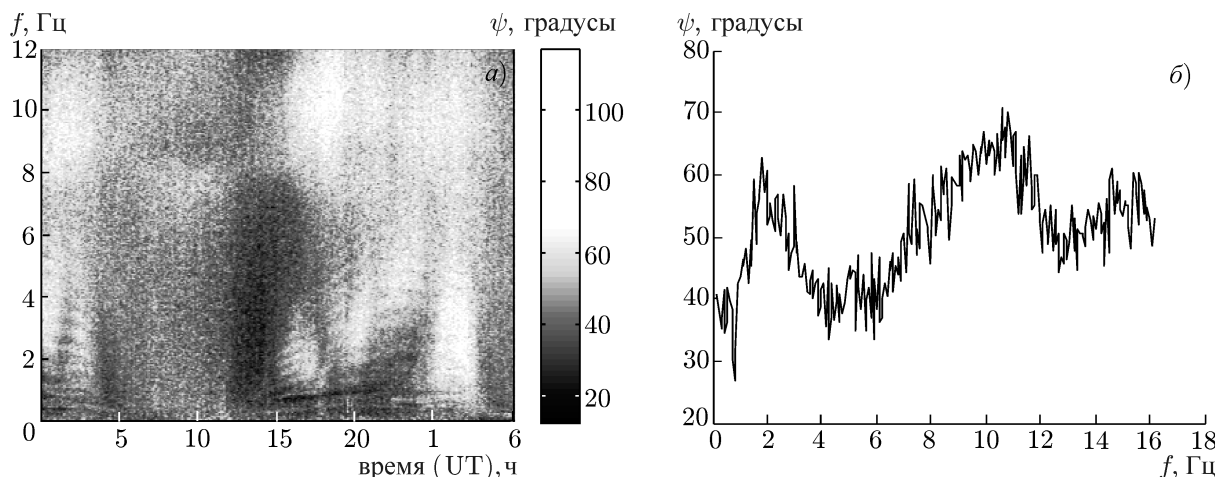


Рис. 8. Спектрограмма (а) и частотная зависимость (б) азимутального угла ψ эллипса поляризации в приёмном пункте «Новая Жизнь» в период отсутствия ярко выраженной грозовой активности 23–24.10.2011 (зависимость на панели б представлена для 17:00 UT 23.10.2011)

зависимость азимутального угла большой оси эллипса поляризации фонового шума. Как известно [8], при сложении двух взаимно-ортогональных по направлению гармонических колебаний со сдвигом фазы, угол между большой осью эллипса поляризации результирующего колебания и осью x определяется следующей формулой:

$$\operatorname{tg} 2\psi = \frac{2a_x a_y \cos \delta}{a_x^2 - a_y^2}. \quad (2)$$

Здесь a_x и a_y — амплитуды колебаний, δ — сдвиг фазы между ними.

Пусть ось x направлена вдоль линии восток–запад; воспользуемся формулой (2), чтобы определить угол между главной осью эллипса поляризации напряжённости магнитного поля в фоновом шуме и осью x . В этом случае a_x и a_y соответствуют горизонтальным спектральным компонентам магнитного шума $H_{ВЗ}$ и $H_{СЮ}$. На рис. 8 приведена спектрограмма азимутального угла для одних суток осенью, когда отсутствовала локальная грозовая активность, а по частотным зависимостям поляризационного параметра ε наблюдалось отчётливое влияние структуры суб-ИАР.

Как следует из рис. 8, структура суб-ИАР существенно меняет частотную зависимость азимутального угла в ночное время: если в светлое время частотной зависимости в отсутствие региональной активности практически нет, то после захода солнца наблюдается немонотонная зависимость азимутального угла от частоты. Чтобы оценить, насколько в ночное время направление по перпендикуляру к вектору горизонтального магнитного поля может отличаться от истинного направления на источник, определим численно азимутальный угол для разных направлений на источник. Вычисления будем проводить, используя формулу (2) и методику расчёта горизонтальных магнитных компонент от наземного источника, развитую в [2, 3]. Результаты моделирования представлены на рис. 9. Как видно из рис. 9, расчёты подтверждают немонотонную зависимость азимутального угла от частоты, которая проявляется на частотах ниже первого шумановского резонанса. Вариация угла составляет $20^\circ \div 25^\circ$, т. е., восстанавливая направление на источник по перпендикуляру к вектору магнитного поля на частотах $1 \div 4$ Гц, мы можем допустить ошибку в определении направления на источник порядка $20^\circ \div 25^\circ$.

Далее проанализируем экспериментальные зависимости азимутального угла от частоты за периоды с разным уровнем локальной грозовой активности. Для построения зависимостей при-

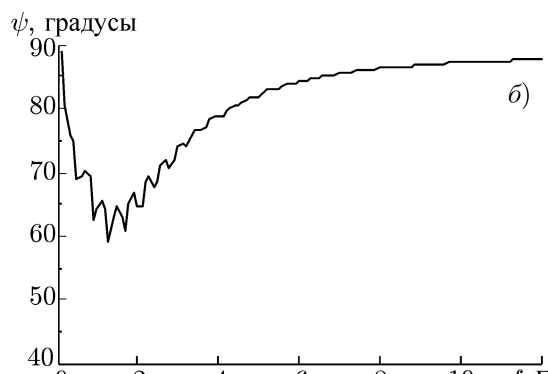
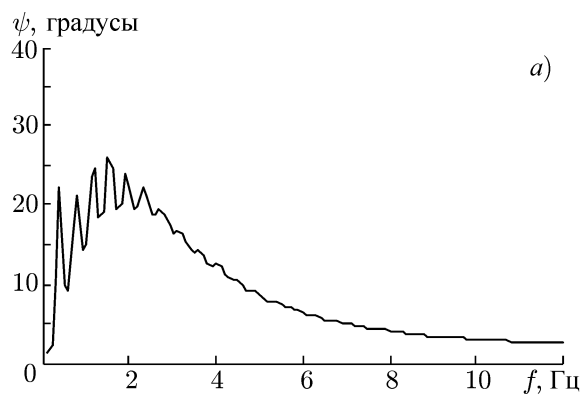


Рис. 9. Результаты моделирования частотных зависимостей азимутального угла ψ в приёмном пункте «Новая Жизнь» для ночного времени (21:30 LT) и разных направлений на источник: *а* — направление на источник вдоль магнитного меридиана, *б* — направление на источник перпендикулярно магнитному меридиану, *в* — направление на источник под углом 45° к магнитному меридиану

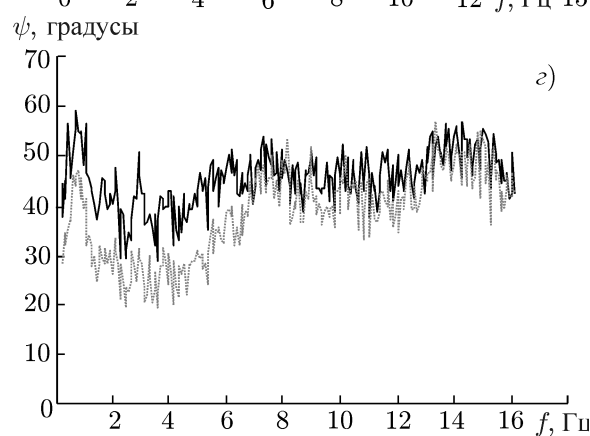
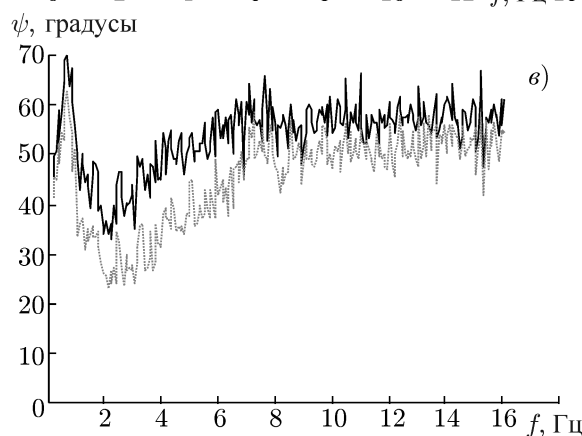
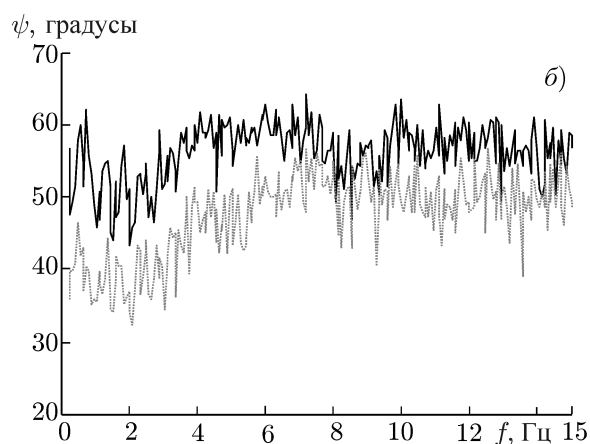
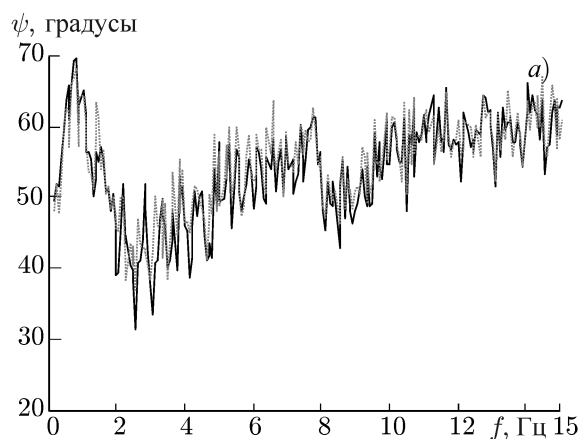
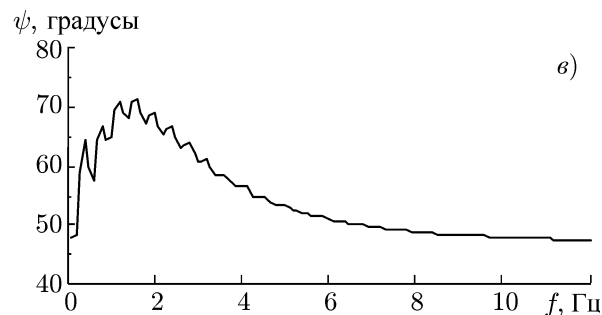


Рис. 10. Частотные зависимости азимутального угла в приёмных пунктах «Новая Жизнь» (чёрные линии) и «Старая Пустынь» (серые пунктирные линии) в периоды с разным уровнем грозовой активности: 18:30 UT 13.08.2010 (*а*), 18:30 UT 01.08.2010 (*б*), 21:50 UT 02.08.2010 (*в*), 22:20 UT 02.08.2010 (*з*)

влекались низкочастотные сигналы с дополнительного приёмного пункта НИРФИ «Старая Пустынь», расположенного западнее на 120 км от основной станции. Зависимости для периодов 13.08.2010 и 02.08.2010 приведены на рис. 10. Графики хорошо совпадают при отсутствии ярко выраженной грозовой активности в Нижегородской области, что подтверждает результаты по ограничению сигнала по амплитуде на рис. 6в, г.

В то же время при наличии локальных грозовых ячеек в Нижегородской области мы наблюдаем отличие в азимутальном угле, особенно ярко выраженное на частотах ниже первого шумановского резонанса. Это отличие свидетельствует о наличии источников на расстояниях от приёмного пункта, сравнимых с базой между приёмными пунктами. Если за 01.08.2010 наличие локальных очагов подтверждается данными метеорадара, то за 02.08.2010 только низкочастотные данные с разнесённых станций являются подтверждением ближних источников, расположенных, возможно, на краю зоны видимости радара. На всех приведённых графиках видна немонотонная зависимость угла ψ от частоты, что свидетельствует о влиянии структуры суб-ИАР, которое наблюдается и при наличии локальных источников.

В период около 22:00 UT 02.08.2010 грозовая активность усилилась (см. рис. 3). Это усиление проявилось, во-первых, изменением азимутального угла ψ (что связано с перемещением локальных источников) и, во-вторых, более плавной частотной зависимостью угла ψ на частотах ниже первого шумановского резонанса (что связано с частичным маскирующим влиянием ближних грозовых очагов). Это подтверждают результаты обработки данных, приведённые на рис. 5. Таким образом, анализ частотной зависимости азимутального угла при повышенной локальной грозовой активности удобен тем, что этот параметр чувствителен и к изменениям положения источников, и к влиянию неоднородной ионосферной структуры суб-ИАР.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ В ЧАСТОТНЫХ ЗАВИСИМОСТЯХ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНОГО УНЧ ШУМА ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ГРОЗОВОГО ФРОНТА

По данным метеорадара был выбран достаточно длительный период (более 5 часов), когда Нижегородскую область с юго-запада на северо-восток пересекал протяжённый (более 100 км)

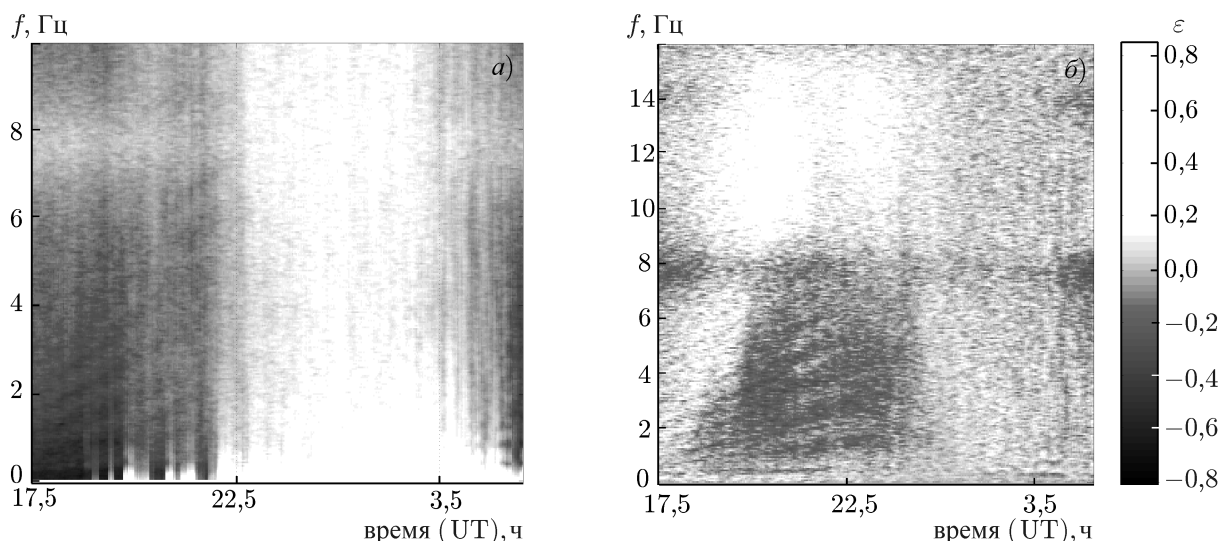


Рис. 11. Спектрограммы магнитной компоненты $H_{\text{НЮ}}$ (а) и поляризационного параметра ε (б) за 11–12.07.2009 в приёмном пункте «Новая Жизнь»

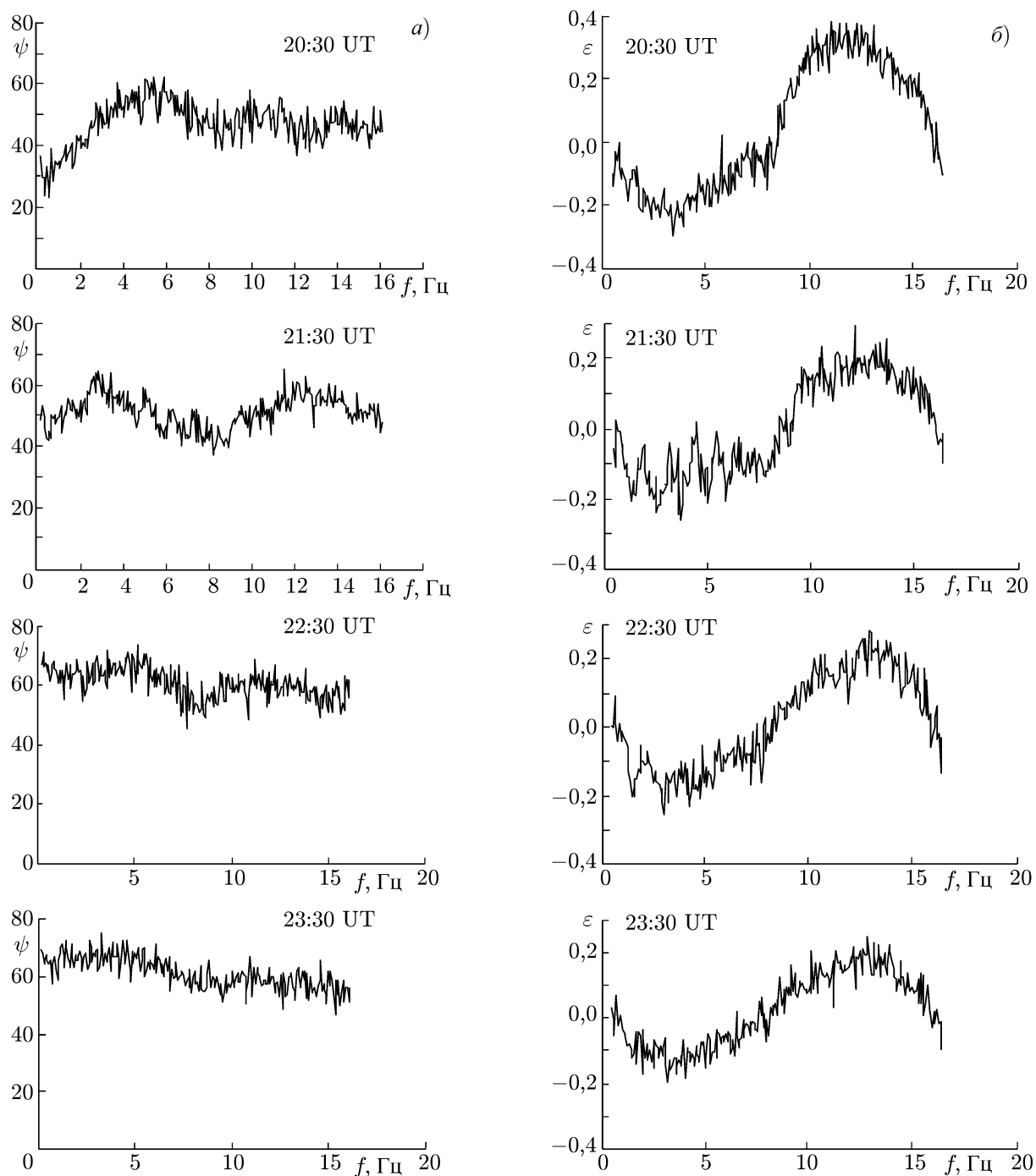


Рис. 12. Частотные зависимости азимутального угла ψ (а) и поляризационного параметра ε (б) магнитного шума 11.07.2009 в приёмном пункте «Новая Жизнь»

фронт грозových очагов, при этом грозových источники оказывались на разных расстояниях от приёмного пункта «Новая Жизнь». На рис. 11 приведены спектрограммы магнитной компоненты $H_{\text{СЮ}}$ и поляризационного параметра ε за 11–12.07.2009.

Как видно из спектрограммы (см. рис. 11а, появление более яркой и светлой области около 22:20 UT) около 21:40 UT резко увеличилась амплитуда магнитной компоненты, что связано с приближением к приёмному пункту фронта грозовой активности. Анализ спектра этой ком-

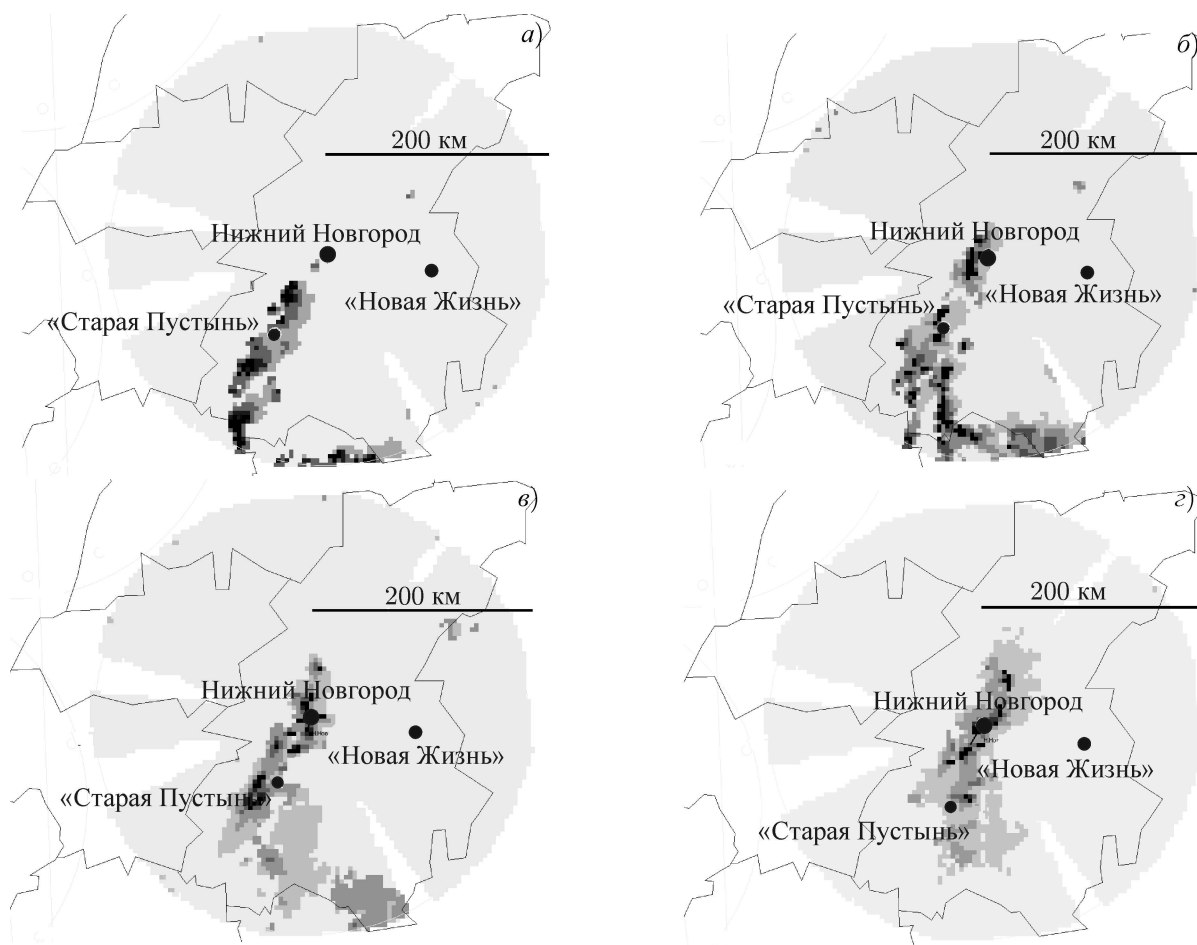


Рис. 13. Карты метеорадара в 20:30 UT (а), 21:30 UT (б), 22:30 UT (в) и 23:30 UT (з) 11.07.2009

поненты показал более чем трёхкратное увеличение амплитуды, однако частотная зависимость параметра ϵ заметно не изменилась. Практически до восхода солнца (00:25 UT) частотная зависимость параметра ϵ имела характерный для тёмного времени суток вид, обусловленный влиянием структуры суб-ИАР.

На рис. 12 представлены частотные зависимости поляризационного параметра ϵ и азимутального угла ψ в период прохождения грозового фронта с 20:30 по 23:30 UT 11.07.2009. Частотные зависимости параметра ϵ подтверждают вывод об отсутствии существенных изменений в поляризационном параметре магнитного шума при наличии локальной грозовой активности. При этом при передвижении локальных источников увеличивается азимутальный угол (во всём частотном диапазоне на $10^\circ \div 15^\circ$), а зависимость от частоты в диапазоне ниже первого шумановского резонанса становится более плавной. Проанализируем положение грозовых очагов за указанный период времени по картам метеорадара, представленным на рис. 13.

Как следует из рис. 13, ближайшие к приёмному пункту очаги переместились за это время с расстояния 150 км по отношению к приёмному пункту до расстояния $85 \div 90$ км. Таким образом, практически за всё время тёмного периода суток источники были удалены от станции на расстояние не менее высоты воздушного зазора системы Земля–ионосфера, и практически всё время наблюдалась немонотонная частотная зависимость параметра поляризации. Таким образом, источники, находящиеся на расстояниях $90 \div 100$ км от принимающей станции, не маскируют

полностью эффект ионосферной полости суб-ИАР. Полную маскировку мы наблюдали при расстояниях $40 \div 50$ км от низкочастотного приёмного пункта до источника (см. рис. 1). Анализ частотных зависимостей азимутального угла (см. рис. 11а) показывает, что полная маскировка проявления структуры суб-ИАР в поведении этого параметра может наступать при больших расстояниях до источника. А именно при расстояниях $80 \div 90$ км (см. рис. 13г) мы наблюдаем практически полное отсутствие зависимости от частоты в спектре угла ψ в диапазоне ниже первого шумановского резонанса.

ВЫВОДЫ

По результатам проведённого исследования можно сделать вывод, что влияние неоднородных ионосферных структур ИАР и суб-ИАР на спектры фоновых магнитного шума может быть заметным и для локальных грозовых источников, расположенных на расстояниях $180 \div 200$ км от приёмного пункта. При этом маскирующее влияние этих структур увеличивается с приближением источника. Грозовые источники, расположенные от приёмных станций ближе $40 \div 50$ км, полностью маскируют влияние ионосферных резонаторов. Следует также отметить, что в спектрах, построенных после ограничения сигнала по амплитуде, не изменились основные параметры резонансных структур — положение максимумов и минимумов в РСС, а также частота, на которой параметр поляризации ϵ меняет свой знак. Таким образом, проведённые исследования показали, что исключение импульсной составляющей магнитного шума не меняло основных параметров резонансных структур в спектрах шума, а изменяло только глубину резонансных осцилляций в спектре амплитуды и частотной зависимости поляризации.

При наличии локальных грозовых очагов не возможно исследование влияния ионосферного резонатора суб-ИАР по спектрам амплитуды магнитных компонент фонового шума. Поскольку даже при удалённости от приёмных пунктов порядка 200 км локальные источники полностью маскируют проявление широкополосного спектрального максимума в спектрах амплитуды из-за неравномерного вклада этих источников в спектральные компоненты на разных частотах (на низких частотах амплитуда увеличивается сильнее). Поэтому для диагностики изменений ионосферных высотных профилей электронной концентрации по вариациям в спектрах фонового шума целесообразно исследовать частотные зависимости поляризационного параметра и азимутального угла главной оси эллипса поляризации горизонтальных компонент магнитного поля.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 13-02-97086-р_поволжье_а, 13-02-00723, 13-02-12074-офи_м, 13-05-12091-офи_м).

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. // Изв. вузов. Радиофизика. 2008. Т. 51, № 7. С. 575.
3. Ермакова Е. Н., Котик Д. С., Поляков С. В., Щенников А. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 7. С. 607.
4. Ермакова Е. Н., Котик Д. С., Першин А. В. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 10–11. С. 671.
5. Schekotov A., Pilipenko V., Shiokawa K., Fedorov E. // Earth Planets Space. 2011. V. 63. P. 1.

6. Поляков С. В., Ермакова Е. Н., Поляков А. С., Якунин М. Н. // Геомагнетизм и аэрономия. 2003. Т. 42, № 2. С. 240.
7. Кириллов В. В., Копейкин В. Н. // Изв. вузов. Радиофизика. 2003. Т. 46, № 1. С. 1.
8. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.

Поступила в редакцию 9 января 2014 г.; принята в печать 17 октября 2014 г.

STUDYING THE EFFECT OF THE LOCAL THUNDERSTORM CELLS ON THE BACKGROUND MAGNETIC ULF NOISE PARAMETER SPECTRA

E. N. Ermakova, D. S. Kotik, A. V. Ryabov, and A. A. Panyutin

We study the effect of the masking factor from the local thunderstorm cells on ULF magnetic field spectra with the inhomogeneous electron-density structures existing in the local ionosphere (ionospheric and lower ionospheric Alfvén resonators). Using an original data-processing technique for recording of horizontal magnetic components at the midlatitude reception point Novaya Zhizn', we have examined the contribution of the sources located at different distances from the reception point and the formation of the background noise spectra. The VLF signal processing technique permitted us to reduce the pulse component of magnetic noise above a certain threshold in amplitude and thus rule out the influence of a local thunderstorm activity. Frequency dependences of the azimuthal angle of the principal axis of the magnetic noise polarization ellipse are also analyzed. It is shown that the presence of the lower ionospheric Alfvén resonator leads to a nonmonotonic dependence of the azimuthal angle on the frequency. It was found that the local thunderstorms within 60–80 km from the reception point completely mask the manifestation of the lower ionospheric Alfvén resonator in the polarization ULF noise parameters. To spot the local thunderstorm cells, we used the data from the meteorological radar facility MRL-4 in Nizhny Novgorod.