

УДК 550.383

ВЛИЯНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ИОНОСФЕРЫ НА ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ УЛЬТРАНИЗКОЧАСТОТНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ОТ НАЗЕМНЫХ ИСТОЧНИКОВ

Е. Н. Ермакова^{1*}, А. В. Першин¹, А. В. Рябов¹, А. В. Щенников¹, А. Д. Акчуриш²

¹ Научно-исследовательский радиофизический институт ННГУ им. Н. И. Лобачевского;

² Казанский федеральный университет, г. Казань, Россия

Обнаружена существенная разница в амплитудных и поляризационных спектрах ультранизкочастотного магнитного шума на станциях, удалённых друг от друга на 120 км, в периоды отсутствия региональной грозовой активности. Одновременный анализ низкочастотных данных и данных ионозондов позволил сделать вывод, что разница в основных параметрах спектра поляризации на двух станциях связана с возникновением спорадических слоёв E_s , интенсивность которых неоднородно распределена по горизонтали с характерными масштабами порядка расстояния между станциями. Разница в глубине вариаций поляризационного параметра ϵ была обнаружена также в период восстановления ионосферы после магнитных бурь. Она могла быть связана со слоями E_s , которые не только имели неоднородное распределение интенсивности, но и располагались на разных высотах. Было обнаружено различие частотных масштабов резонансной структуры спектра в период регистрации временных вариаций её основных частот. Численные расчёты параметра ϵ с заданием модельных слоёв E_s и скорректированных на высотах слоя F ионосферы профилей электронной концентрации позволили адекватно объяснить наблюдаемое различие в спектрах магнитного шума и определить высоты, на которых существовала горизонтальная неоднородность ионосферы. Исследования проводились на основе данных регистрации горизонтальных магнитных компонент на среднеширотных обсерваториях НИРФИ «Новая Жизнь» (56° с. ш., $45,74^\circ$ в. д.) и «Старая Пустынь» ($55,66^\circ$ с. ш., $43,63^\circ$ в. д., расположена в 120 км к востоку от первого приёмного пункта).

ВВЕДЕНИЕ

Хорошо известно, что естественные низкочастотные электромагнитные шумы различной природы на поверхности земли имеют различные характерные масштабы изменения. В силу удалённости источника грозовой шум (частоты $f \geq 0,2$ Гц) слабо меняется на масштабах базы $d \approx 100$ км при разнесённой регистрации, поэтому ультранизкочастотные (УНЧ) магнитные поля должны обладать высокой степенью когерентности. Это позволяет в эксперименте по обнаружению сигналов от локальных источников увеличивать отношение сигнал/шум путём вычитания временных реализаций [1, 2]. В данной работе мы рассмотрим случай, когда пространственное распределение шумовых полей от дальних грозовых источников может иметь мелкомасштабную структуру (100÷120 км). Исследования строятся на изучении спектральных структур УНЧ полей, связанных с влиянием ионосферного альфвеновского резонатора (ИАР) и ионосферного альфвеновского «суб-резонатора» (суб-ИАР), формируемого долиной между областями E и F . Ионосферный альфвеновский резонатор обуславливает существование резонансной структуры спектра в фоновом магнитном УНЧ шуме в диапазоне 0,1÷15,0 Гц [3–5]. Также в работах [3–5] показано, что параметры резонансной структуры определяются локальными свойствами ионосферы над пунктом регистрации шумовых полей. Теоретические исследования, выполненные в работе [6], подтвердили, что на формирование резонансной структуры спектра горизонтальная

* l.ermakova@nirfi.unn.ru

неоднородность ионосферы вдоль трассы распространения низкочастотных полей от грозových источников к приёмнику влияет слабо. Поэтому характер резонансных спектров определяется свойствами локальной области ионосферы над точкой приёма.

На низкочастотном пункте «Новая Жизнь» был впервые обнаружен так называемый широкополосный спектральный максимум на частотах $2 \div 7$ Гц [7, 8]. В работе [8] был предложен механизм формирования этого максимума, связанный с наличием долины в профиле электронной концентрации N_e между слоями E и F на высотах $120 \div 300$ км [9]. Благодаря большому градиенту показателя преломления на границах, данная область обладает собственными резонансными свойствами, отличными от ИАР, т. е. представляет собой суб-ИАР, и именно эти свойства могут служить причиной появления широкополосного спектрального максимума. В работе [8] также было установлено, что, помимо максимума спектральной плотности энергии шума, влияние суб-ИАР обуславливает соответствующие крупномасштабные частотные вариации поляризационного параметра ε , который зависит от отношения право- к лево-поляризованной компоненте шума. В работе [10] был сделан вывод, что основным параметром спектра поляризации в области широкополосного спектрального максимума является граничная частота $f_{гр}$, отделяющая области частот с левой (ниже $f_{гр}$) и правой (выше $f_{гр}$) поляризацией шума. В работе [10] на основе численных расчётов было показано, что частота $f_{гр}$ не зависит от горизонтальной неоднородности ионосферной плазмы вдоль трассы распространения низкочастотных волн и от направления на источник и полностью определяется локальными свойствами ионосферы над точкой регистрации УНЧ полей. В работе [11] было также показано, что именно спектры поляризации наиболее чувствительны к изменениям ионосферных параметров на высотах $80 \div 350$ км и менее подвержены маскирующему влиянию локальных гроз. Влияние суб-ИАР было обнаружено и на более низких широтах (о. Крит, $35,15^\circ$ с. ш., $25,20^\circ$ в. д.). На крупномасштабные частотные вариации в спектре поляризации фонового магнитного шума на этой станции в тёмное время суток было указано в работе [12]. В работах [13] такой характер спектров параметра ε был связан с влиянием суб-ИАР.

Вышесказанное даёт возможность развивать методы диагностики параметров ионосферы на основе анализа экспериментальных и расчётных спектров поляризационного параметра. В работе [13] было высказано предположение, что часто наблюдающиеся изменения $f_{гр}$ связаны с сильной изменчивостью плазмы низкоширотной ионосферы на высотах суб-ИАР.

В работе [14] было показано, что появление достаточно интенсивных спорадических слоёв E_s с плазменной частотой $f_{0E_s} > 3 \div 5$ МГц может существенно изменять параметры спектра поляризации, что связано с вариациями оптической толщины и добротности суб-ИАР.

Таким образом, влияние ионосферных неоднородных структур (ИАР и суб-ИАР) на амплитудные и поляризационные спектры фонового шума имеет локальный характер и позволяет по анализу спектральных параметров судить о временных и пространственных изменениях в профилях электронной концентрации ионосферы. Но неизученным остаётся вопрос о пространственном разрешении такого метода диагностики. В данной работе показано, что горизонтально неоднородное распределение электронной концентрации в ионосфере с масштабами порядка 120 км может быть зарегистрировано в вариациях спектров грозového шума. Исследования выполнены на основе комплексного анализа данных разнесённой регистраций УНЧ магнитных полей, данных ионозондовых станций и численных расчётов параметра ε , выполненных с использованием модели IRI-2016 и профилей электронной концентрации N_e , скорректированных по данным ионозондов. Определены различия в профилях N_e , приводящие к разнице спектральных параметров фонового шума на разнесённых станциях.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

В работе использованы данные по регистрации тангенциальных компонент магнитного фонового шума на среднеширотных пунктах «Новая Жизнь» (Нижегородская область, 46° с. ш., $45,74^\circ$ в. д.) и «Старая Пустынь» ($55,66^\circ$ с. ш., $43,63^\circ$ в. д.), а также данные ионозондов, расположенных в Нижегородской области (29 км от пункта «Новая Жизнь»), московского ионозонда ($55,47^\circ$ с. ш., $37,3^\circ$ в. д.) и ионозонда Казанского федерального университета ($55,8^\circ$ с. ш., $48,5^\circ$ в. д.). Для обработки данных выбирались периоды без локальной грозовой активности, когда на низкочастотных станциях была обнаружена разница в амплитудных и поляризационных спектрах магнитного шума.

Были рассмотрены летние магнитоспокойные периоды 2010 и 2012 годов, периоды восстановления ионосферы после магнитной бури 25.06.2015 и зимний период 12.12.2010.

Обработка заключалась в построении спектров амплитуды магнитных компонент и поляризационного параметра на временном интервале 10 с с последующим усреднением $60 \div 80$ спектральных реализаций, что соответствует усреднению по 10 мин. Амплитудные спектры строились также для контроля над уровнем локальной грозовой активности и уровнем техногенных помех. Параметр поляризации ε на обеих станциях вычислялся по следующей формуле:

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

Здесь $H_R = (H_{СЮ} + iH_{ВЗ})/\sqrt{2}$, $H_L = (H_{СЮ} - iH_{ВЗ})/\sqrt{2}$ — право- и лево-поляризованные компоненты магнитного поля соответственно, $H_{СЮ}$ и $H_{ВЗ}$ — компоненты магнитного поля, ориентированные вдоль линий север—юг и восток—запад соответственно. Правая поляризация соответствует направлению вращения вектора поля в ту же сторону, в которую вращаются отрицательно заряженные частицы.

На рис. 1 представлены спектрограммы поляризационного параметра и амплитудный спектр магнитной компоненты $H_{ВЗ}$ за вечерний период 28.06.2010 на обеих станциях.

Из рис. 1а, в видно, что в спектре компоненты $H_{ВЗ}$ присутствует широкополосный максимум (жёлтое пятно на спектрограмме), причём его появление на станции «Новая Жизнь» наблюдается примерно на $45 \div 50$ мин раньше, чем на станции «Старая Пустынь». На спектрограммах поляризационного параметра чёрной линией обозначены значения $f_{ГР}$ ($\varepsilon(f_{ГР}) = 0$). В спектрограммах ε в интервале 20:00—23:00 UT регистрируются очень низкие значения $f_{ГР}$ ($2 \div 3$ Гц) на обеих станциях (рис. 1б, г). Минимальное значение $f_{ГР}$ на станции «Старая Пустынь» регистрируются на $40 \div 50$ мин позднее, чем на станции «Новая Жизнь», и этот период совпадает со временем отчётливой регистрации широкополосного максимума на станции «Старая Пустынь» рис.1г. На рис. 1д представлены спектры поляризационного параметра на обеих станциях для 19:13 UT. Отчётливо видны разные значения $f_{ГР}$ и глубины осцилляций ε : на станции «Новая Жизнь» большим значениям поляризационного параметра соответствуют меньшие значения $f_{ГР}$. Это означает большую оптическую толщину слоёв на высотах E -слоя и долины и более высокую добротность суб-ИАР на этой станции. На рис. 1е представлены спектры магнитной компоненты $H_{ВЗ}$ для 21:53 UT. Видно, что для этого временного отрезка широкополосный максимум был более ярко выражен на станции «Старая Пустынь». Этому моменту соответствуют более низкие значения $f_{ГР}$ в спектре ε на этой станции (рис. 1б, г).

На рис. 2 приведены спектрограммы магнитных компонент и параметра ε , а также спектры ε для другого летнего периода 09.06.2012. Как и в первом случае, при регистрации широкополосного максимума (а также минимальных значений $f_{ГР}$ и максимальных значений ε) наблюдается

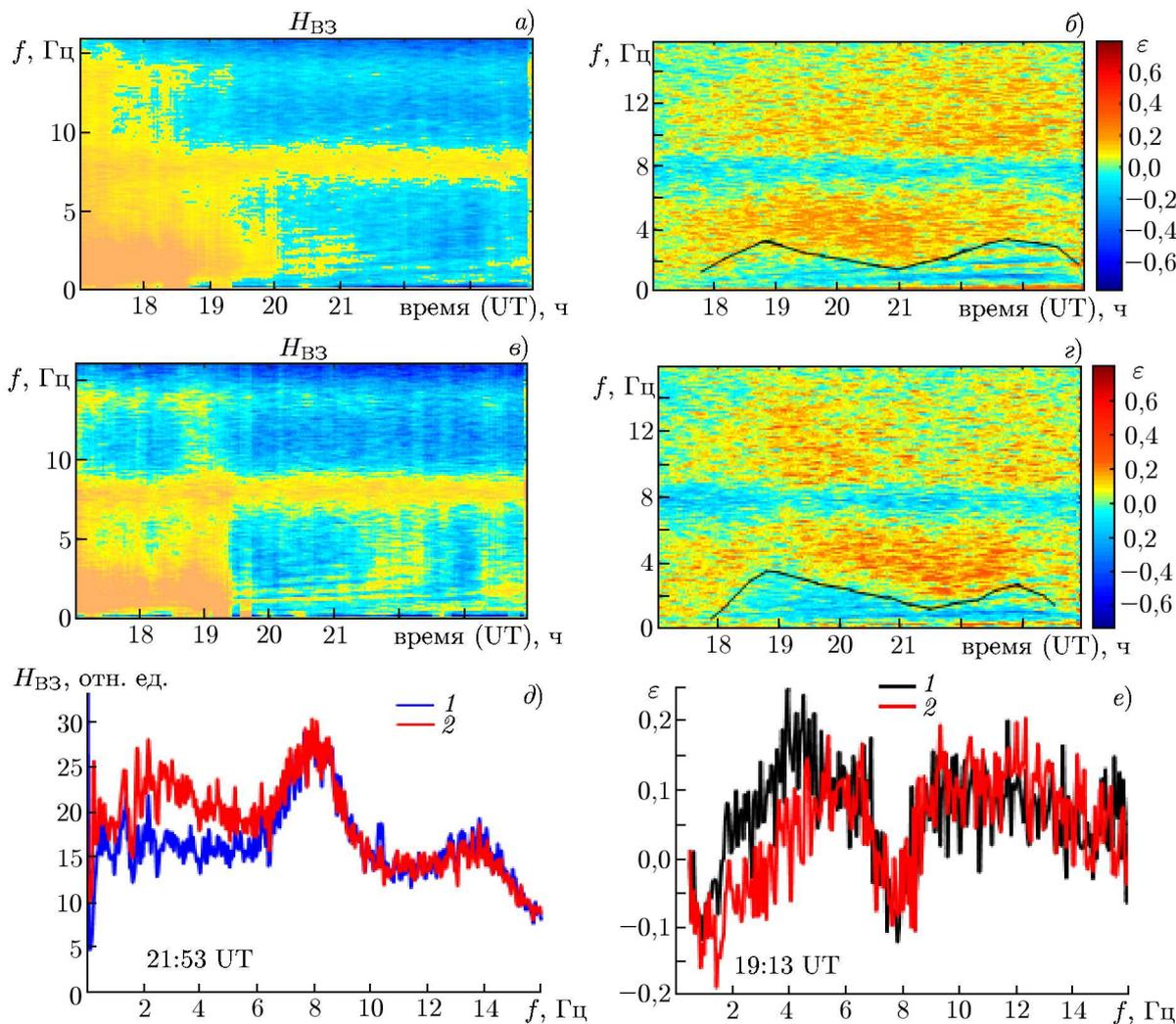


Рис. 1. Спектрограммы амплитуды магнитной компоненты H_{VZ} (a — станция «Новая Жизнь», c — станция «Старая Пустынь») и поляризационного параметра ε (b — станция «Новая Жизнь», d — станция «Старая Пустынь») УНЧ магнитного шума; спектры амплитуды компоненты H_{VZ} (d) и спектры ε (e) на станциях «Новая Жизнь» (кривые 1) и «Старая Пустынь» (кривые 2) 28.06.2010. Здесь и далее на спектрограммах H_{VZ} синий цвет соответствует более низким значениям амплитуды магнитной компоненты

временной сдвиг между станциями 30 мин. От предыдущего этот случай отличается резким ростом $f_{гр}$ на обеих станциях после 21:00 UT, причём этот рост раньше начинается также на станции «Новая Жизнь». Надо отметить, что и в этом случае меньшим значениям $f_{гр}$ соответствуют большие значения глубины вариаций ε .

Следующий период, когда была обнаружена разница в спектрах поляризационного параметра (10.06.2012), представлен на рис. 3. В этот период были обнаружены очень низкие (1,0÷1,8 Гц) значения $f_{гр}$ до 19:15 UT на станции «Новая Жизнь» и до 19:50 UT — на станции «Старая Пустынь». Затем наблюдается значительный рост граничной частоты до значений 4 Гц и выше. Поскольку периоды резкого изменения в спектрах ε не совпадают, то существует интервал времени, когда характер спектров на обеих станциях существенно различается (см. рис. 3б). Но и в этом случае меньшим значениям $f_{гр}$ соответствуют большие значения ε . После резкого изменения параметров поляризации на обеих станциях наблюдается хорошее совпадение в спектрах ε (рис. 3г).

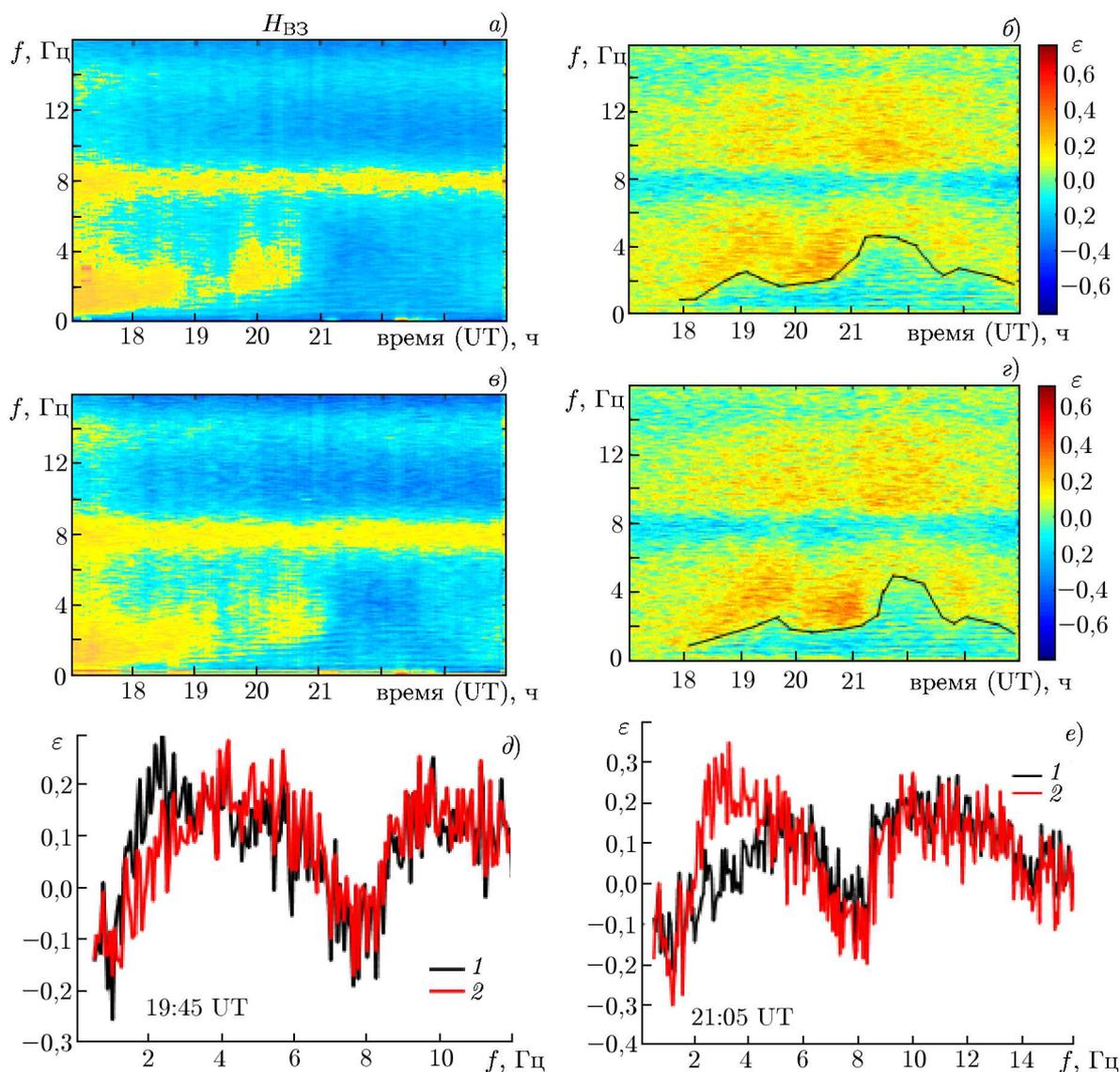


Рис. 2. Спектрограммы амплитуды магнитной компоненты H_{V3} (а, станция «Новая Жизнь», в, станция «Старая Пустынь») и поляризационного параметра ε (б — станция «Новая Жизнь», г — станция «Старая Пустынь») УНЧ магнитного шума; спектры ε (д, е) на станциях «Новая Жизнь» (кривые 1) и «Старая Пустынь» (кривые 2) 09.10.2012

Данные, полученные в период восстановления ионосферы после магнитных бурь (25.06.2015), представлены на рис. 4. В спектре ε , как и в предыдущих случаях, наблюдаются низкие значения граничной частоты ($1,5 \div 1,8$ Гц). С 20:10 UT регистрируются разница в величинах граничной частоты и глубине осцилляций на станциях (см. рис. 4б, в). Разница в значениях $f_{гр}$ на станциях не велика, порядка 0,5 Гц, разница в значениях ε варьируется в пределах $0,07 \div 0,10$. При этом меньшим значениям ε в этом случае соответствовали меньшие значения глубины осцилляций на станции «Старая Пустынь». После 22:00 UT на станциях наблюдается рост $f_{гр}$ до значений порядка 3 Гц и уменьшение глубины вариаций (рис. 4а). Около 22:30 UT на станции «Старая Пустынь» практически пропадает частотная зависимость с изменением знака, в то время как на станции «Новая Жизнь» такая зависимость остаётся (рис. 4е).

Одновременный анализ низкочастотных данных на разнесённых станциях позволил также

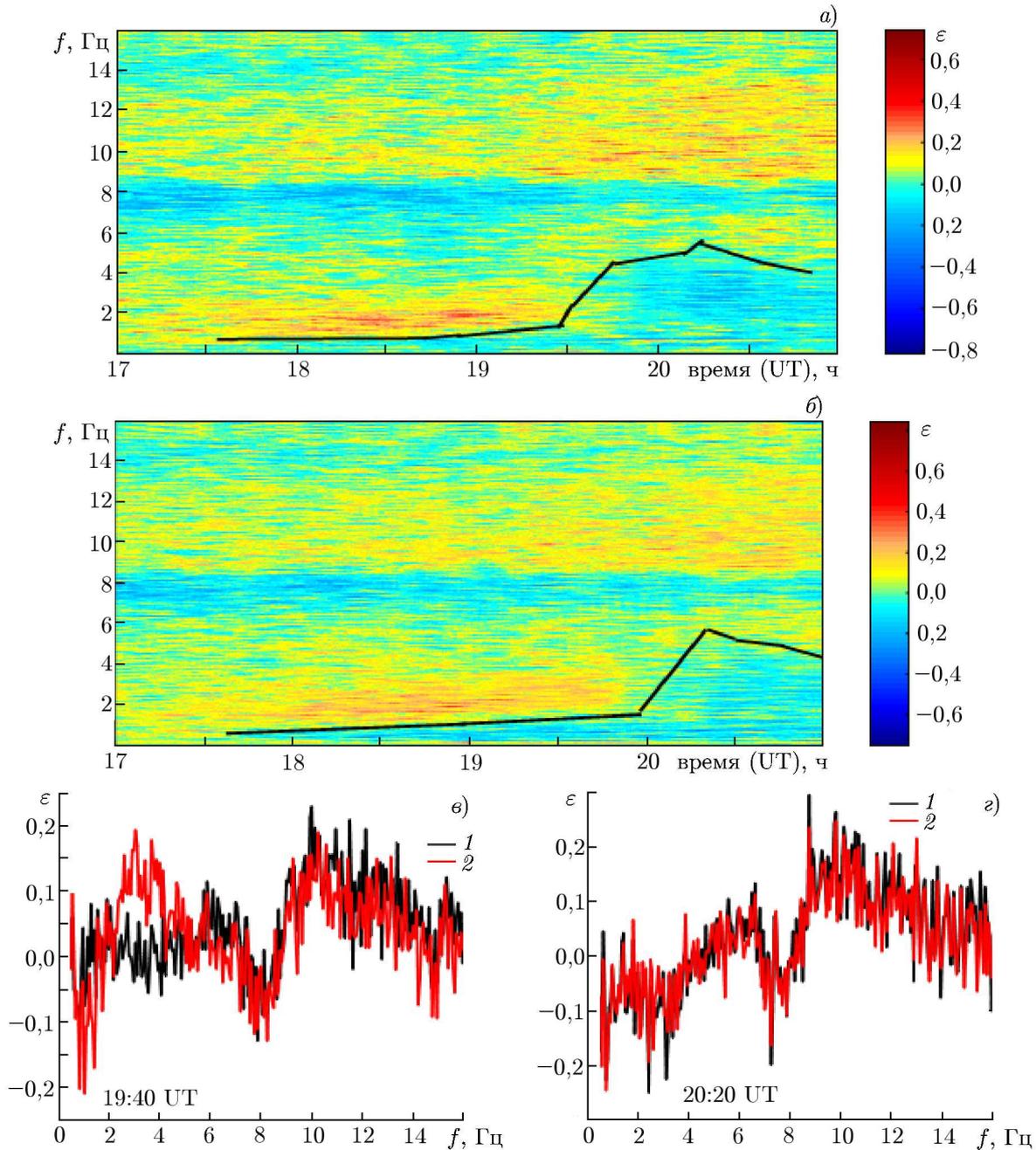


Рис. 3. Спектрограммы поляризационного параметра ε УНЧ магнитного шума на станциях «Новая Жизнь» (а) и «Старая Пустынь» (б); спектры ε (в, г) на станциях «Новая Жизнь» (кривые 1) и «Старая Пустынь» (кривые 2) 10.06.2012

обнаружить различие в параметрах резонансной структуры спектра за период 12.12.2010 (см. рис. 5). На рис. 5а, в видна разница в глубине вариаций минимумов резонансной структуры на разных станциях. Это привело к разным значениям частотного масштаба Δf во время временных вариаций основных частот резонансной структуры с периодом $2,5 \div 3,0$ ч. Из рис. 5б–е следует, что глубина осцилляций ε , определяемая добротностью ИАР, на станциях различалась несущественно, а наиболее отчётливо разница в положении максимумов и минимумов резонансной структуры видна на частотах, превышающих 3 Гц (рис. 5д, е), когда сказался эффект, накопленный из-за

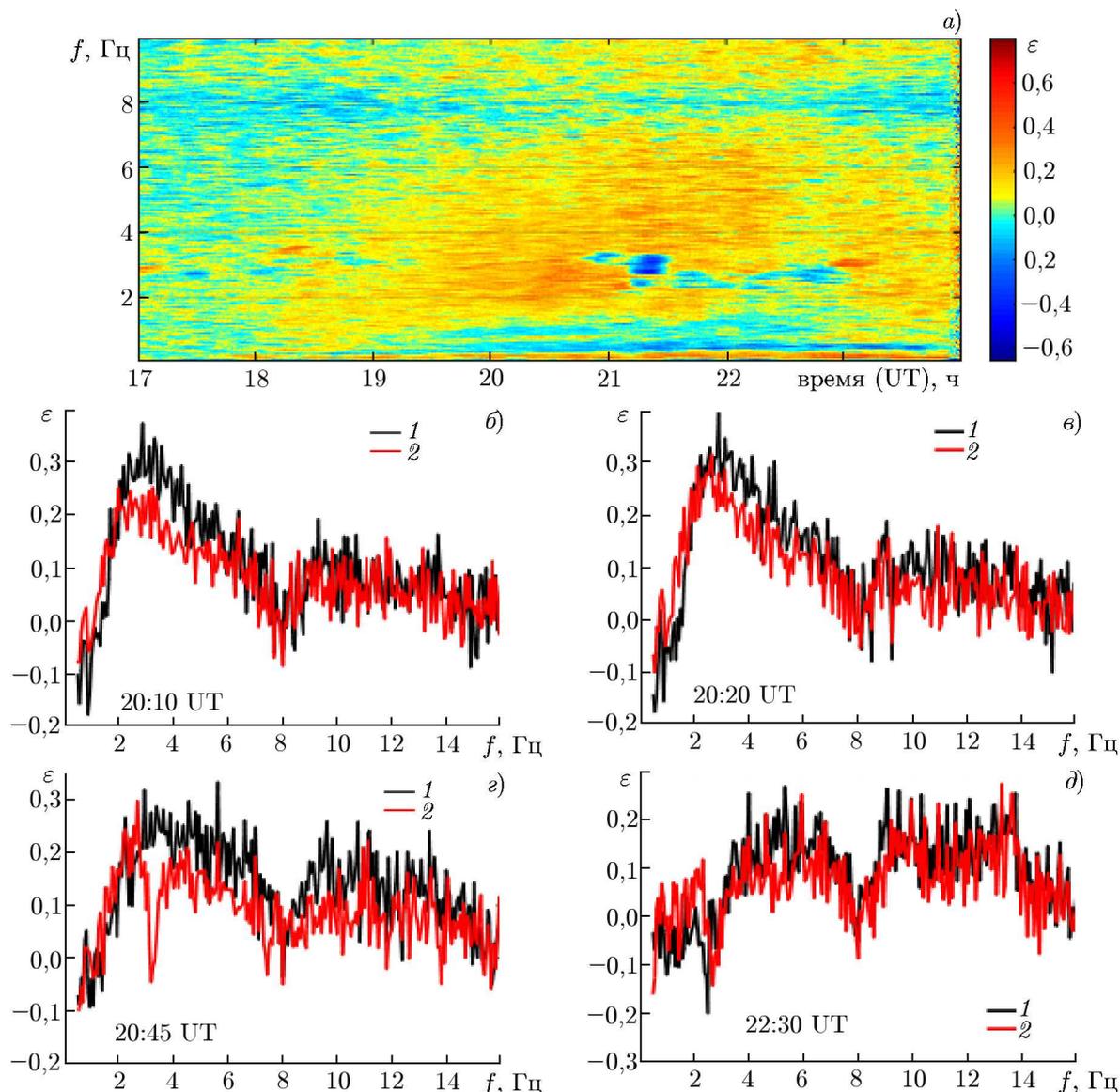


Рис. 4. Спектрограмма поляризационного параметра ε УНЧ магнитного шума на станции «Старая Пустынь» (а); спектры ε (б–д) на станциях «Новая Жизнь» (кривые 1) и «Старая Пустынь» (кривые 2) 25.06.2015

разных значений частотного масштаба Δf . Кроме того, существенная глубина осцилляций резонансной структуры в этот период привела к кажущемуся уширению и раздвоению шумановского резонанса, ярко выраженному только на станции «Новая Жизнь» (рис. 5е). Надо также отметить, что разница в параметрах крупномасштабной вариации, связанной с влиянием структуры суб-ИАР, в этот период на станциях не обнаружена.

2. ОБСУЖДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ. СОПОСТАВЛЕНИЕ С ДАННЫМИ ИОНОЗОНДОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Для интерпретации обнаруженных различий в амплитудных и поляризационных спектрах УНЧ магнитного шума при разнесённом приёме с малыми базами проанализируем данные ионо-

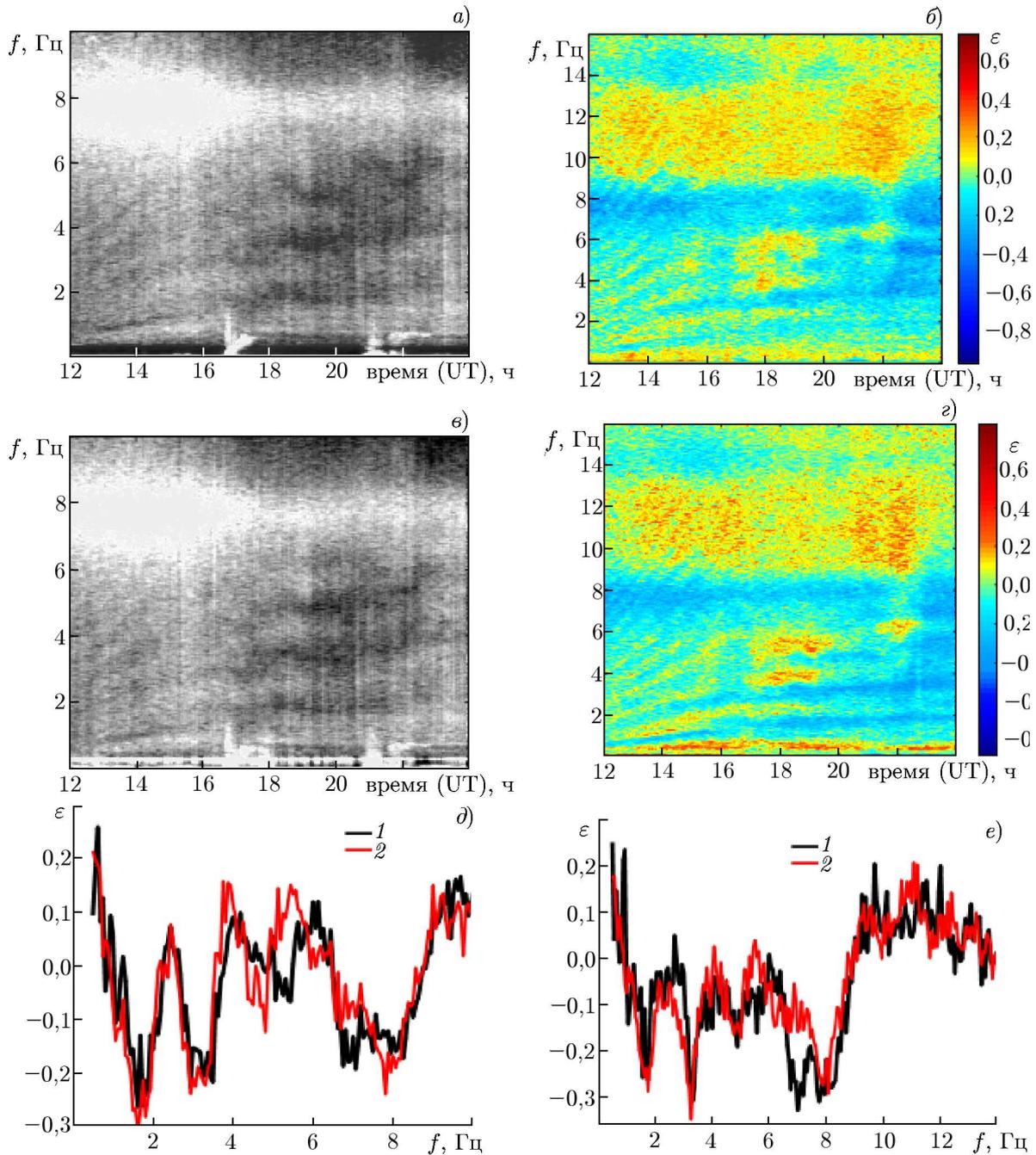


Рис. 5. Спектрограммы магнитной компоненты H_{VZ} (a – станция «Новая Жизнь», c – станция «Старая Пустынь»), поляризационного параметра ε (b – станция «Новая Жизнь», e – станция «Старая Пустынь») УНЧ магнитного шума; спектры ε (d , e) на станциях «Новая Жизнь» (кривые 1) и «Старая Пустынь» (кривые 2) 12.12.2010. На спектрограммах H_{VZ} чёрный цвет соответствует более низким значениям амплитуды магнитной компоненты

зондов, расположенных на различных расстояниях от низкочастотных обсерваторий. На рис. 6а приведены результаты обработки данных ионозонда, находящегося на расстоянии 29 км от пункта «Новая Жизнь» для 09.06.2012. Представлены временные зависимости плазменных частот максимума F -слоя (f_{0F_2}) и спорадического слоя E_s (f_{0E_s}). Одновременно для наглядности пока-

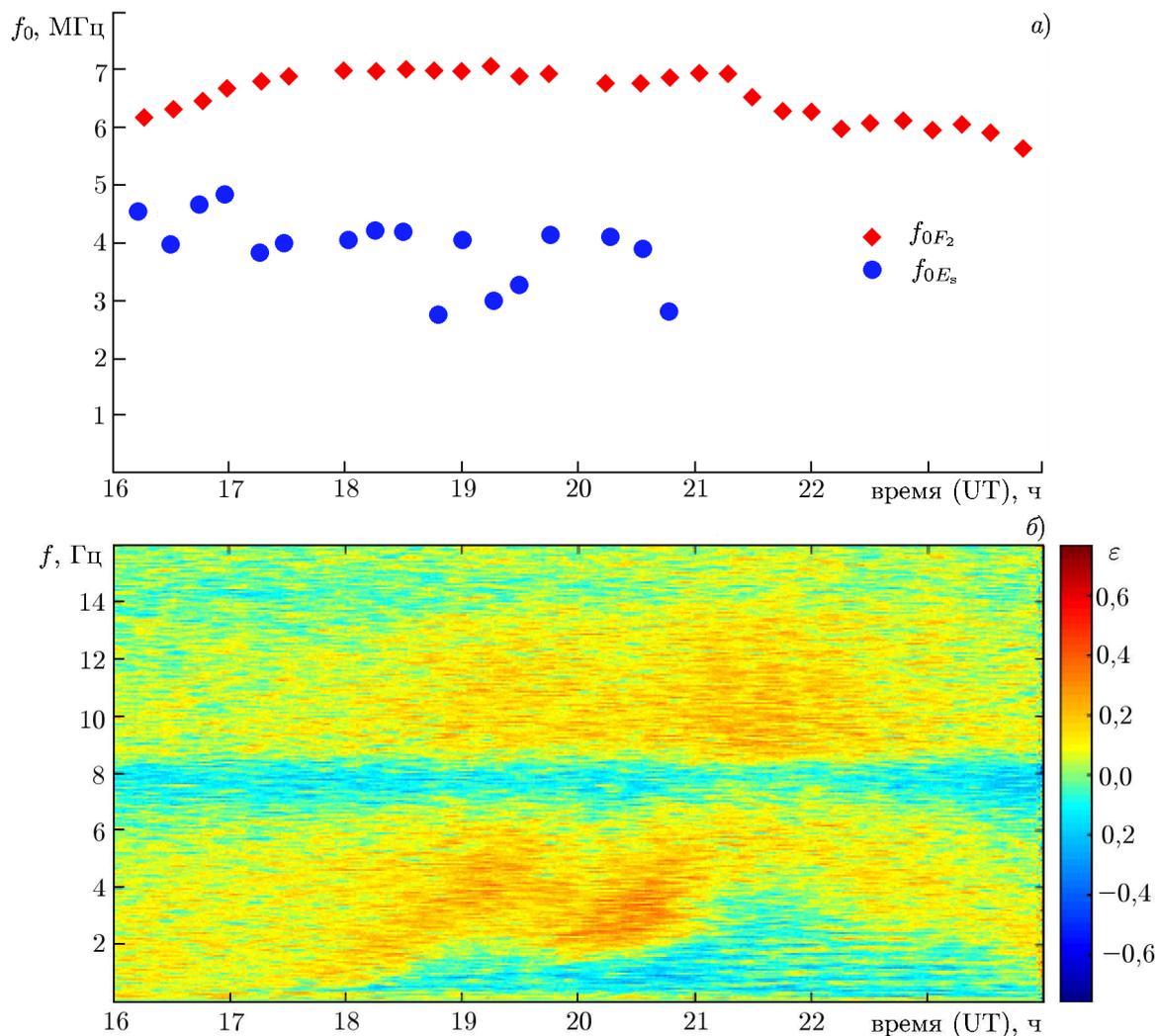


Рис. 6. Динамика плазменных частот максимума слоя F и слоя E_s по данным ионозонда, расположенного в 29 км от станции «Новая Жизнь» (а) и спектрограмма ϵ на этой станции (б) 09.06.2012

зана спектрограмма ϵ для станции «Новая Жизнь». Аналогичные графики приведены на рис. 7 для 10.06.2012. Сравнительный анализ данных ионозонда и УНЧ регистрации показывает, что возникновение слоя E_s коррелировало с низкими значениями $f_{\text{ГР}}$ на станции «Новая Жизнь», а его исчезновение — с увеличением $f_{\text{ГР}}$ и уменьшением глубины осцилляций в спектре ϵ . На станции «Старая Пустынь» такие вариации в спектральных параметрах поляризации наблюдаются позже, что позволяет предположить, что в ионосфере над этой станцией исчезновение спорадического слоя произошло на 30÷40 мин позднее. То же самое можно утверждать на основе анализа одновременных экспериментальных данных низкочастотной станции и ионозондовых измерений 10.06.2012: более позднее резкое изменение в спектре ϵ на станции «Старая Пустынь» после 21:30 UT связано, по-видимому, с более поздним исчезновением слоя E_s над этой станцией. Таким образом, в периоды, близкие к исчезновению слоя E_s , существует горизонтальная неоднородность его интенсивности с масштабами порядка базы разнесённого приёма. Наши выводы подтверждают результаты работы [14], в которой на основе экспериментальных данных и модельных расчётов доказано влияние слоёв E_s на спектры поляризации фонового шума и зависимость вариаций $f_{\text{ГР}}$ в спектре ϵ от интенсивности спорадических слоёв.

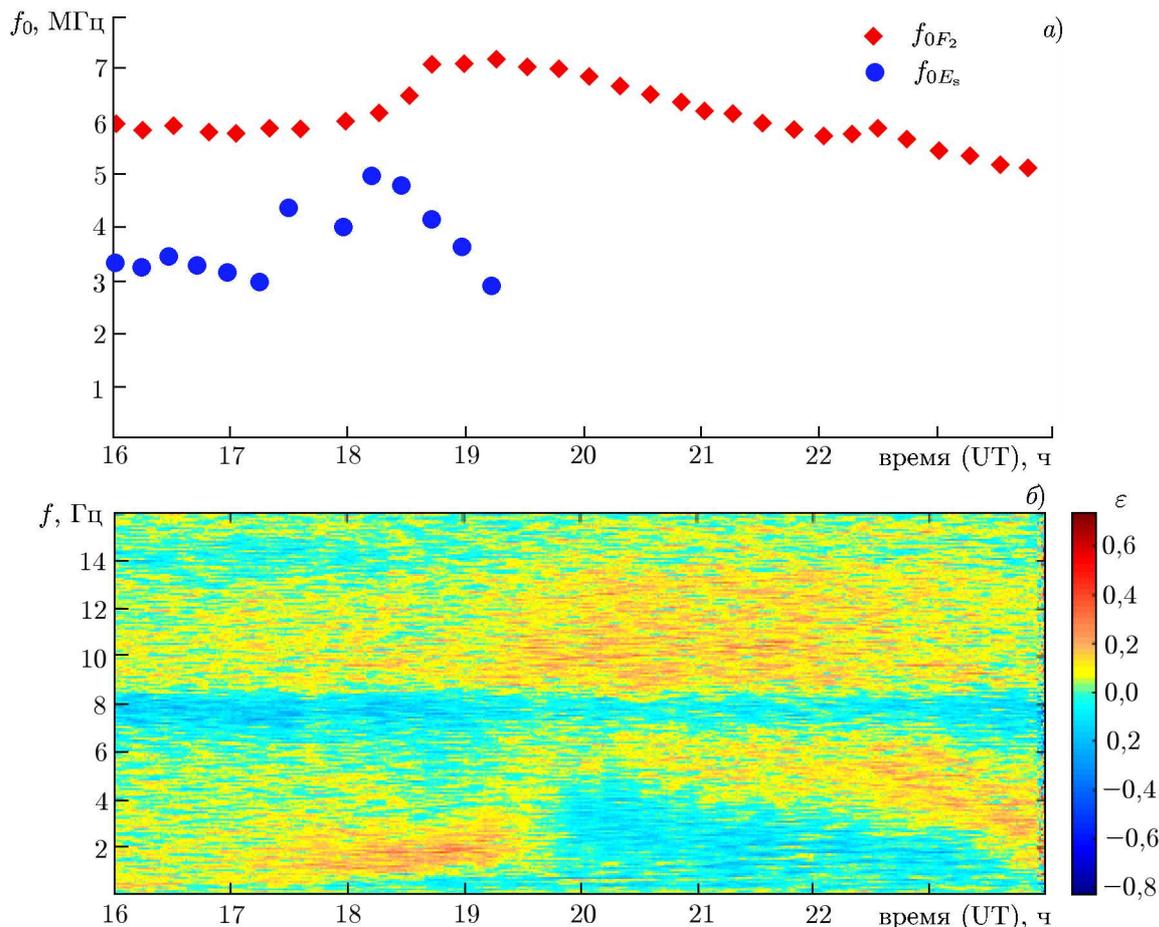


Рис. 7. То же самое, что на рис. 6, для вечернего периода 10.06.2012

Также надо отметить, что разница в значениях $f_{гр}$ 9 и 10 июня 2012 года на каждой станции объясняется разницей в значениях f_{0E_s} в эти периоды времени: более высоким значениям $f_{0E_s} = 4 \div 6$ МГц 10.06.2012 соответствовали более низкие значения $f_{гр}$ (около 1 Гц).

Для анализа данных разнесённой регистрации за 28.06.2010 используем измерения московского ионозонда и ионозонда Казанского федерального университета (КФУ), т. к. до 2012 года ионозондовая станция вблизи низкочастотного пункта в режиме непрерывного мониторинга не работала. Хотя расстояния от низкочастотных пунктов до этих ионозондов больше или сравнимы с базой разнесённого приёма, данные ионозондов могут быть использованы для получения дополнительной информации об ионосферных слоях 28.06.2010. На рис. 8 приведены спектрограмма поляризации параметра на станции «Новая Жизнь» (a) и данные ионозондовой станции КФУ (б). Данные ионозонда свидетельствуют о существовании слоёв E_s . Динамика плазменной частоты спорадических слоёв по данным ионозонда КФУ приведена для интервала 19:00—24:00 UT (рис. 8б). Как видно из рис. 8а, б динамика f_{0E_s} не коррелирует с изменениями $f_{гр}$ в спектре ϵ , и максимальному значению f_{0E_s} (20:00 UT) не соответствует минимальное значение $f_{гр}$, которое наблюдается около 20:50 UT. Также рост $f_{гр}$ после 21:00 UT на станции «Новая Жизнь» наблюдается в период увеличения f_{0E_s} в ионосфере над казанским ионозондом, хотя более плотные слои E_s , повышая оптическую толщину резонатора суб-ИАР, должны приводить к уменьшению граничной частоты. На основе низкочастотных данных и данных ионозонда, удалённого от приёмного пункта «Новая Жизнь» на расстояние порядка 170 км, а также резуль-

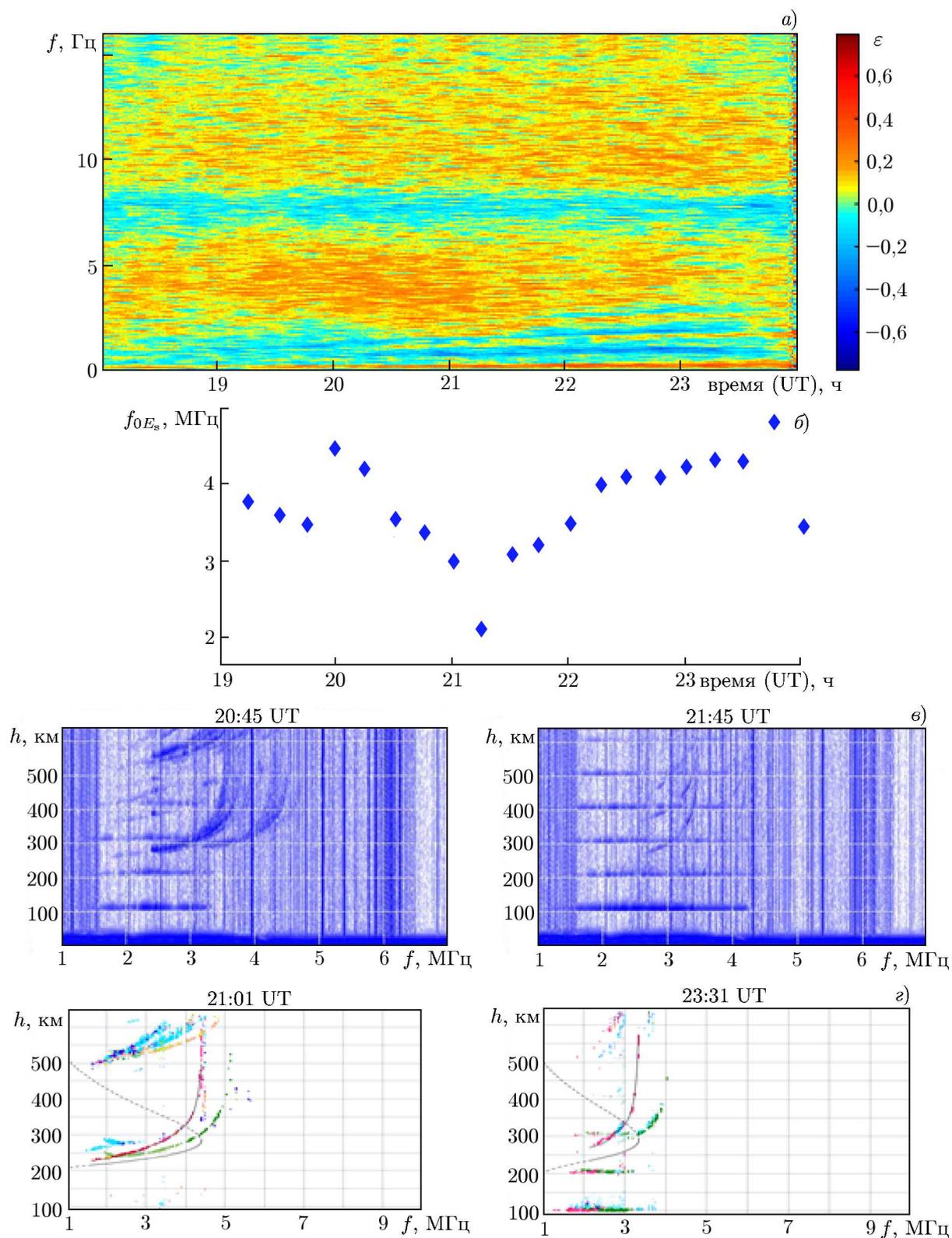


Рис. 8. Спектрограмма ε на станции «Новая Жизнь» (а), динамика плазменной частоты слоя E_s (б) по данным ионозонда КФУ, ионограммы ионозонда КФУ (с) и московского ионозонда (z) 28.06.2010

татов работы [14], можно сделать вывод о горизонтальной неоднородности спорадических слоёв 28.06.2010 с пространственными масштабами $120 \div 170$ км. Стоит также отметить, что московский зонд регистрировал спорадические слои 28.06.2010 только начиная с 23:30 UT (рис. 8з).

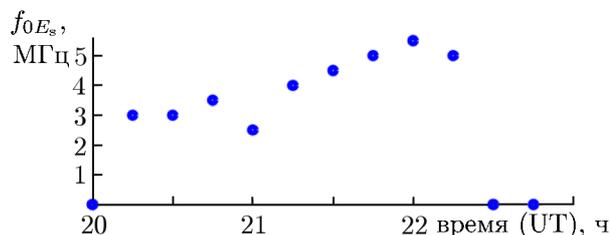


Рис. 9. Динамика плазменной частоты слоя E_s по данным ионозонда, расположенного в 29 км от пункта «Новая Жизнь» 25.06.2015

Проанализируем данные ионозонда в период восстановления ионосферы после магнитной бури 25.06.2015. В этот день также были зарегистрированы спорадические слои на ближайшей к пункту «Новая Жизнь» ионозондовой станции: до 21:00 UT плазменные частоты слоёв E_s были невысоки (в пределах $2,5 \div 3,0$ МГц), после 21:00 UT f_{0E_s} выросла до $4 \div 5$ МГц, а после 22:30 UT и до 23:15 UT наблюдалось исчезновение слоёв E_s (см. рис. 9). Разница в спектрах ε была зарегистрирована в период с 20:00

до 21:00 UT (см. рис. 4б, в, г). Поскольку была зарегистрирована и разница в глубине осциллирующий параметра ε , то мы предполагаем, что на разных станциях могли отличаться не только величины f_{0E_s} , но и высота возникновения слоёв E_s . По данным работы [14], данная высота может существенно менять глубину вариаций параметра ε : для более высоко расположенных слоёв (высоты $115 \div 120$ км) глубина осцилляций может существенно уменьшаться. Модельные расчёты, демонстрирующие возможность интерпретировать наблюдаемую разницу в спектрах поляризации с учётом разницы в высоте положения слоя E_s и его плазменной частоте, представлены в следующем разделе. Разница в спектрах ε наблюдалась также около 22:30 UT в период, близкий к исчезновению слоя E_s на станции «Новая Жизнь» (рис. 4д, рис. 9). На наш взгляд, малая глубина вариаций и только положительные значения ε связаны с интенсивными и, возможно, имеющими большую толщину слоями E_s в ионосфере над станцией «Старая Пустынь», в то время, когда эти слои уже пропали над станцией «Новая Жизнь». Таким образом, резкие временные изменения в параметрах спорадических слоёв могут приводить и к неоднородности их пространственного распределения. Изменчивость параметров спорадических слоёв 25.06.2015 подтверждается и данными московского ионозонда, которым были зарегистрированы слои E_s с $f_{0E_s} = 2 \div 6$ МГц на высотах $100 \div 119$ км (данные не приведены для краткости). К сожалению, 12.12.2010 отсутствовали данные ионозондов НИРФИ и КФУ. За указанный период были проанализированы данные московского ионозонда. Из анализа ионограмм следует, что в ионосфере над московским ионозондом в интервале 16:00 \div 19:00 UT наблюдалась вариация плазменной частоты F_2 -слоя порядка $0,3 \div 0,4$ МГц с периодом около 3 ч, что могло служить косвенным подтверждением возмущений ионосферы на высотах F -слоя не только над московским ионозондом, но и над станциями «Старая Пустынь» и «Новая Жизнь».

3. МОДЕЛЬНЫЕ РАСЧЁТЫ СПЕКТРОВ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ПАРАМЕТРА

В данной статье мы будем использовать результаты решения задачи о вычислении магнитных компонент от вертикального электрического диполя в сферическом горизонтально-неоднородном волноводе Земля—ионосфера [12] и пользоваться методикой расчёта поверхностного импеданса анизотропной и неоднородной ионосферы, развитой в работах [15, 16]. Продольная и поперечная компоненты вычисляются по следующим формулам:

$$H_\varphi = \frac{\Pi \sqrt{D_S}}{4\pi a h(1)} \left([h_L^{-1}(2)]^{\theta\theta} + \frac{h_{S_m, \theta\varphi}}{h_{S_m, \theta\theta}} [h_L^{-1}(2)]^{\theta\varphi} \right) \operatorname{ctg} \left(\frac{r}{2a} \right),$$

$$H_\theta = \frac{I \sqrt{D_S}}{4\pi a h(1)} \left([h_L^{-1}(2)]^{\vartheta\theta} + \frac{h_{S_m, \theta\varphi}}{h_{S_m, \theta\theta}} [h_L^{-1}(2)]^{\varphi\varphi} \right) \operatorname{ctg} \left(\frac{r}{2a} \right). \quad (2)$$

Здесь I — токовый момент источника, a — радиус Земли, r — расстояние от источника до приёмника по геодезической линии, ϑ и φ — сферические координаты на поверхности Земли, ось ϑ направлена вдоль геодезической линии, соединяющей источник и приёмник, D_S — детерминант матрицы $\hat{\mathbf{h}}_{S_m}$, $h(1)$ — высота нижней границы ионосферы в точке источника, цифра 2 означает, что компоненты матрицы $\hat{\mathbf{h}}_L^{-1}$ определяются в точке приёмного пункта, формулы для вычисления матриц $\hat{\mathbf{h}}_L^{-1}$ и $\hat{\mathbf{h}}_{S_m}$ приведены в [6, 17]. Надо отметить, что использование решения для сферического волновода, полученного в работе [17], позволяет учитывать горизонтальную неоднородность ионосферы вдоль трассы распространения УНЧ волн. Однако, как было показано в работе [6], характер спектров магнитного УНЧ поля мало зависит от неоднородности ионосферных параметров вдоль трассы распространения низкочастотных волн и определяется в основном компонентами матрицы $\hat{\mathbf{h}}_L^{-1}$ в точке регистрации магнитных полей. Также надо отметить, что амплитудные и поляризационные спектры расчётных полей не учитывают особенностей шумановского резонанса. Но, как показал анализ экспериментальных спектров фонового шума, влияние шумановского резонанса меняет характер поляризации в узком частотном диапазоне около основной частоты $f_{\text{ш}}$. Результаты расчётов, которые будут приведены ниже, также показывают, что выше этого частотного диапазона модельные спектры параметра ε адекватно описывают характер его экспериментальных спектров.

Параметр ε вычисляется по формуле (1). При расчётах предполагалось, что направление на источник лежит в плоскости магнитного меридиана. Это оправдано, т. к. в работе [10] показано, что параметры спектра ε не зависят существенно от направления на источник. Необходимые для расчётов профили ионосферных параметров (концентрации электронов и ионов разных типов, температура нейтральных молекул) выбирались на базе международного стандарта ионосферы (IRI-2016 [18]) и атмосферы (MSIS-E-00 Atmosphere Model [19]). Также при расчётах использовались скорректированные по измерениям ионозондов профили электронной концентрации на высотах 80 ÷ 350 км. Поскольку разница в спектрах параметра ε часто наблюдалась одновременно с наблюдением слоёв E_s , мы использовали при расчётах модельный спорадический слой, заданный коррективкой электронной концентрации N_e на высотах 100 ÷ 120 км (включение спорадических слоёв E_s в модель IRI-2016 не предусмотрено). Максимальная концентрация слоя E_s вычислялась по данным ионозондовых измерений. Особенности задания параметров модельных слоёв при расчётах подробно описаны в работе [14].

Спектры параметра ε , рассчитанные на основе профилей ионосферных параметров для модели IRI за 09.06.2012, приведены на рис. 10. В этот день наблюдалось изменение спектров поляризационного параметра, возникающее при регистрации спорадических слоёв. Расчётный спектр ε (рис. 10а) показывает, что разница в плазменных частотах слоёв E_s , находящихся на одной высоте (для вычислений было выбрано $h = 100$ км), приводит к разным значениям граничной частоты $f_{\text{гр}}$ и глубины осцилляций ε , причём большей интенсивности слоя E_s соответствуют большие значения ε и меньшие значения $f_{\text{гр}}$. Именно такое различие наблюдалось в характере экспериментальных спектров ε на обеих станциях 09.06.2012, 10.06.2012 и 28.06.2010 (рис. 1е, рис. 2д, е, рис. 3в). Это позволяет сделать вывод, что причиной различий в спектрах ε в эти периоды была горизонтальная неоднородность именно интенсивности слоёв E_s . Наибольшая разница в параметрах этих спектров наблюдалась в период исчезновения слоёв E_s только на одной станции. Расчётный спектр на рис. 10б демонстрирует эту разницу в параметрах спектра ε , когда она наблюдалась, например, в 19:40 UT 10.06.2012 (рис. 3в). Другой характер различий в спектральных параметрах ε , наблюдаемых 25.06.2015, объясняется модельными спектрами на рис. 10в: в этом

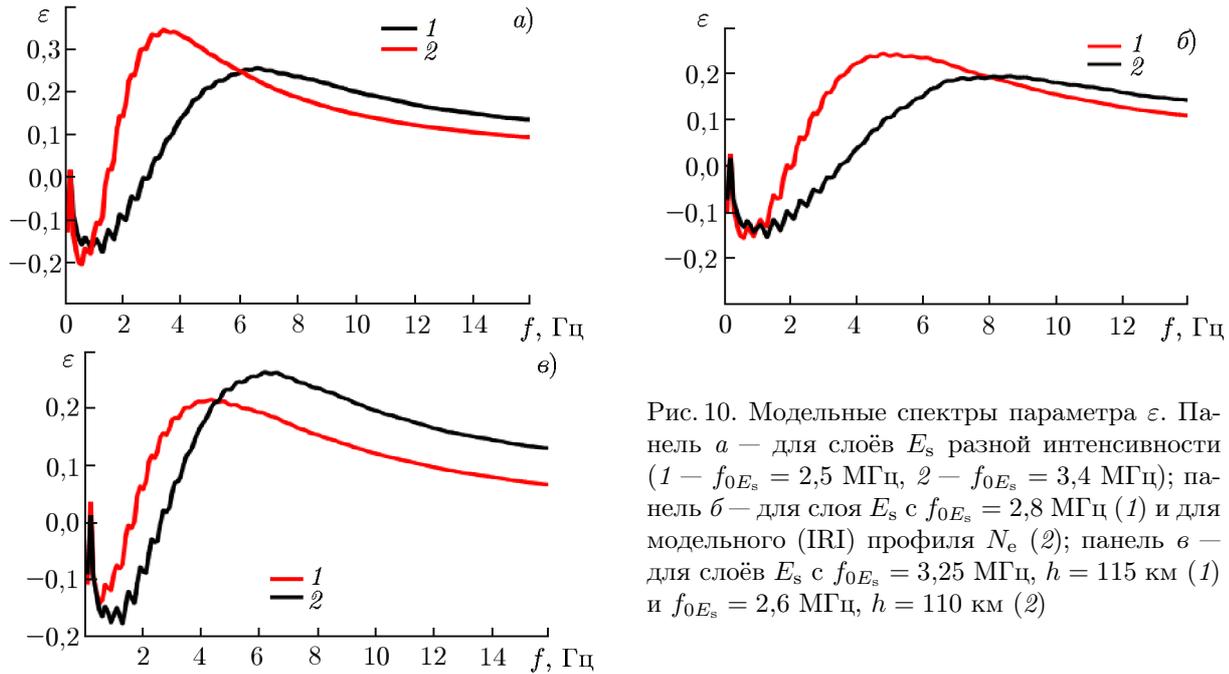


Рис. 10. Модельные спектры параметра ϵ . Панель *a* — для слоёв E_s разной интенсивности ($1 - f_{0E_s} = 2,5$ МГц, $2 - f_{0E_s} = 3,4$ МГц); панель *b* — для слоя E_s с $f_{0E_s} = 2,8$ МГц (1) и для модельного (IRI) профиля N_e (2); панель *c* — для слоёв E_s с $f_{0E_s} = 3,25$ МГц, $h = 115$ км (1) и $f_{0E_s} = 2,6$ МГц, $h = 110$ км (2)

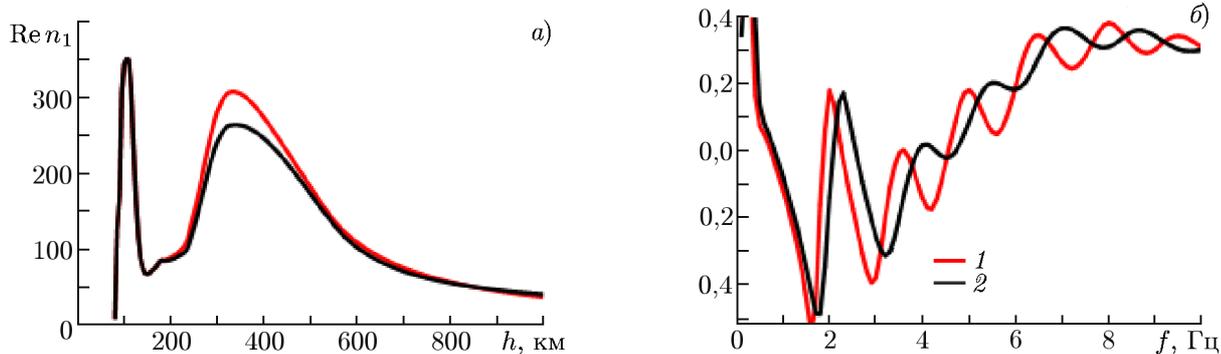


Рис. 11. Панель *a* — модельные профили показателя преломления ($Re n_1$) одной из нормальных низкочастотных волн в ионосфере, построенные по скорректированным на высотах F -слоя профилям N_e за период 12.12.2010; панель *b* — модельные профили параметра ϵ , соответствующие профилю $Re n_1$

случае различия должны были быть не только в значениях f_{0E_s} , но и в высотном положении спорадических слоёв. При этом более интенсивные слои должны были находиться на больших высотах ($f_{0E_s} = 3,25$ МГц, $h = 115$ км), а менее интенсивные — на меньших ($f_{0E_s} = 2,6$ МГц, $h = 110$ км). Это связано с тем, что, как показано в работе [14], более низкое расположение слоёв E_s приводит к существенному увеличению добротности резонатора суб-ИАР.

Модельные расчёты поляризационного параметра ϵ для периода 12.12.2010, когда наблюдалась разница в параметрах резонансной структуры спектра, были выполнены для значений $f_{0F_2} \sim \sim 1,9$ и $2,2$ МГц. Это позволило максимально приблизить расчётные значения Δf к наблюдаемым в эксперименте ($1,6 \div 1,8$ Гц, рис. 5*d*). На рис. 11 приведены модельные спектры показателя преломления одной из нормальных низкочастотных волн, распространяющихся в ионосфере, и параметра ϵ . Выбран разный характер спада электронной концентрации для различных значений f_{0F_2} : для $f_{0F_2} = 2,2$ МГц — профиль NeQuick модели IRI-2016, для $f_{0F_2} = 1,9$ МГц — более плавный профиль IRI01corr. Задание высотного профиля электронной концентрации, та-

ким образом, позволило получить примерно равную глубину осцилляций резонансной структуры спектра для обеих значений плазменных частот F -слоя. Как видно из рис. 11а, разница в профилях N_e затронула только высоты вблизи максимума F -слоя в интервале порядка 120 км. Таким образом, наблюдаемую разницу в параметрах резонансной структуры спектра удалось адекватно объяснить различием в величине f_{0F_2} в ионосфере над разными станциями на 0,3 МГц. Надо отметить, что в работе [20] авторы теоретически исследовали зависимость параметров резонансных осцилляций (положение максимумов и минимумов) от расстояния на больших удалениях от наземного источника. Разница в параметрах резонансной структуры спектра объяснялась влиянием ионосферного магнитогидродинамического (МГД) волновода. Рассматривалась однородная в горизонтальном направлении ионосфера. На наш взгляд, на больших расстояниях от источника горизонтальная неоднородность ионосферных параметров может приводить к существенному затуханию УНЧ волн в МГД волноводе, когда распространение хотя бы на части трассы происходит в дневной ионосфере. Это может нивелировать вклад этого волновода в формирование спектров УНЧ шума в пункте приёма.

Авторы не стремились к полному количественному совпадению расчётных и экспериментальных спектров ε . Целью было определить высоты, на которых могла наблюдаться разница в величинах электронной концентрации, явившаяся причиной наблюдаемых различий в амплитудных и поляризационных спектрах УНЧ шума при малых базах.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнительный анализ низкочастотных данных на станциях, разнесённых на расстояние порядка 120 км, позволил обнаружить разницу в амплитудных и поляризационных спектрах УНЧ фонового шума в периоды отсутствия региональной грозовой активности. Различия в спектральных параметрах УНЧ магнитных полей были зарегистрированы в летние магнитоспокойные периоды и в периоды восстановления ионосферы после магнитных бурь. Одновременный анализ низкочастотных данных и данных ионозонда позволил сделать вывод, что, как правило, разница в основных характеристиках спектров амплитуды и поляризации на двух станциях связана с возникновением спорадических слоёв E_s , имеющих неоднородное горизонтальное распределение с характерными масштабами порядка базы между станциями. На основе комплексного анализа экспериментальных и модельных спектров установлено, что наблюдаемая разница в спектрах поляризационного параметра была связана с отличиями в интенсивности и высотном положении слоёв E_s .

Также было установлено, что наблюдаемое различие в положении максимумов резонансной структуры спектра на разных станциях связано с возмущениями электронной концентрации N_e на высотах F -слоя. Отличие значений f_{0F_2} на 0,3 МГц позволило объяснить разницу в частотных масштабах резонансной структуры спектра на обеих станциях. Надо отметить, что в большинстве случаев разница в спектрах шума на малых расстояниях наблюдалась в период кратковременных изменений в параметрах слоёв E_s и значений N_e на высотах F -слоя, которые могли приводить и к неоднородности их пространственного распределения.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что пространственное разрешение метода диагностики высотных профилей N_e , основанного на сравнительном анализе экспериментальных и модельных спектральных параметров поляризации УНЧ магнитного шума, не превышает 120 км.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 18-42-520035-р_поволжье_a и 18-05-00108-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Поляков С. В., Резников Б. И., Шлюгаев Ю. В., Копытенко Ю. А. // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т. 49, № 12. С. 1 030.
2. Поляков С. В., Щенников А. В., Тан Ч. // Изв. вузов. Радиофизика. 2014. Т. 57, № 7. С. 555.
3. Беляев П. П., Поляков С. В., Рапопорт В. О., Трахтенгерц В. Ю. // Докл. АН СССР. 1987. Т. 297. С. 840.
4. Беляев П. П., Поляков С. В., Рапопорт В. О., Трахтенгерц В. Ю. // Изв. вузов. Радиофизика. 1989. Т. 32, № 7. С. 802.
5. Böisinger T., Haldoupis C., Belyaev P. P., et al. // J. Geophys. Res. A. 2002. V. 107, No. 10. P. 1 281.
6. Ермакова Е. Н., Поляков С. В., Семёнова Н. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2011. Т. 54, № 12. С. 881.
7. Беляев П. П., Поляков С. В., Ермакова Е. Н. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2002. Т. 45, № 2. С. 156.
8. Ермакова Е. Н., Котик Д. С., Поляков С. В., Щенников А. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 7. С. 607.
9. Titheridge J. E. // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 2003. V. 65, No. 9. P. 1 035.
10. Ермакова Е. Н., Котик Д. С., Першин А. В. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 9. С. 605.
11. Ермакова Е. Н., Котик Д. С., Рябов А. В., Панютин А. А. // Изв. вузов. Радиофизика. 2014. Т. 57, № 11. С. 712.
12. Böisinger T., Shalimov S. L. // Ann. Geophysicae. 2004. V. 22. P. 1.
13. Böisinger T., Demekhov A. G., Ermakova E. N., et al. // J. Geophys. Res. Space Phys. 2014. V. 119, No. 5. P. 4 109.
14. Ермакова Е. Н., Котик Д. С., Першин А. В. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2016. Т. 59, № 12. С. 1059.
15. Ермакова Е. Н., Котик Д. С., Поляков С. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2008. Т. 51, № 7. С. 575.
16. Böisinger T., Ermakova E. N., Haldoupis C., Kotik D. S. // Ann. Geophysicae. 2009. V. 27. P. 1 313.
17. Кириллов В. В., Копейкин В. Н. // Изв. вузов. Радиофизика. 2003. Т. 46, № 1. С. 1.
18. https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/iri2016_vitmo.php.
19. <https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/nrlmsise00.php>.
20. Fedorov E., Mazur N., Pilipenko V., Baddeley L. // J. Geophys. Res. Space Phys. 2016. V. 121, No. 11. P. 11 282.

Поступила в редакцию 5 апреля 2019 г.; принята в печать 31 мая 2019 г.

**INFLUENCE OF HORIZONTAL IONOSPHERIC IRREGULARITIES
ON THE SPATIAL DISTRIBUTION OF ULTRALOW-FREQUENCY MAGNETIC
FIELDS FROM GROUND-BASED SOURCES**

E. N. Ermakova, A. V. Pershin, A. V. Ryabov, A. V. Schennikov, and A. D. Akchurin

A significant difference was found in the amplitude and polarization spectra of ULF magnetic noise at stations with a base of 120 km during periods of absence of regional thunderstorm activity. A simultaneous analysis of low-frequency data and ionosonde data allowed us to conclude that the difference in the main parameters of the polarization spectrum at two stations is due to the appearance

of sporadic E_s layers having a nonuniform horizontal intensity distribution with characteristic scales of the order of the base between stations. A difference in the depth of variations in the polarization parameter ε was also found during the recovery of the ionosphere after magnetic storms. It could be related with E_s layers, which had not only a nonuniform intensity distribution, but were also located at different altitudes. A difference was found in the frequency scales of the spectral resonance structure during recording of time variations of its fundamental frequencies. Numerical calculations of the parameter ε with specifying model E_s layers and electron-density profiles corrected at the altitudes of the ionospheric F layer adequately explained the observed difference in the magnetic noise spectra and determined the altitudes at which the horizontal ionospheric irregularity existed. The studies were carried out on the basis of records of horizontal magnetic components at mid-latitude Radiophysical Research Institute observatories Novaya Zhizn (56° N, 45.74° E) and Staraya Pustyn (55.66° N, 43.63° E, 120 km east of the first reception point).