

УДК 550.383

ВЛИЯНИЕ ВАРИАЦИЙ ПАРАМЕТРОВ ИОНОСФЕРЫ НА ВЫСОТАХ 80 ÷ 350 км НА СУТОЧНУЮ ДИНАМИКУ СПЕКТРОВ УЛЬТРАНИЗКОЧАСТОТНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА СРЕДНИХ ШИРОТАХ

Е. Н. Ермакова^{1*}, *Д. С. Котик*¹, *А. В. Першин*¹, *В. А. Пилипенко*², *К. Шиокава*³

¹ Научно-исследовательский радиофизический институт ННГУ им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород;

² Институт физики земли РАН, г. Москва, Россия

³ Университет Нагой, г. Нагоя, Япония

Исследованы причины спорадических и долговременных вариаций поляризационного спектра ультранизкочастотного (УНЧ) магнитного фонового шума на средних широтах. Использовались результаты регистрации низкочастотных горизонтальных магнитных компонент на среднеширотной обсерватории НИРФИ «Новая жизнь» (56,00° с. ш., 45,74° в. д.) и японской станции «Мошири» (44,37° с. ш., 142,27° в. д.). Также анализировались данные ионозондов, расположенных в России (станция «Васильсурск») и в Японии (станция «Вакканай»). Обнаружено влияние спорадических слоёв E_s на частотный спектр поляризации шума. Показано, что появление достаточно интенсивных спорадических слоёв E_s с критическими частотами $f_{0E_s} > 3 \div 5$ МГц может существенно изменять параметры спектра поляризации, что связано с изменением оптической толщины и добротности ионосферного альфвеновского суб-резонатора, формируемого долиной между областями E и F . Численное моделирование поляризационного параметра фонового шума, выполненное с использованием скорректированной по данным ионозондов модели IRI-2012, подтвердило, что слой E_s с толщиной порядка 2 ÷ 5 км и критическими частотами $f_{0E_s} > 3 \div 5$ МГц может приводить к резкому уменьшению граничной частоты $f_{гр}$, разделяющей области частот с левой и правой поляризацией шума, и даже к полному исчезновению проявления суб-ионосферного альфвеновского резонатора в спектре поляризационного параметра. Численные расчёты выявили также влияние высотного положения слоя E_s на добротность данного резонатора. Обсуждается влияние вариаций высоты и критической частоты максимума слоя F , а также электронной концентрации на высотах слоя E и долины на особенности суточной динамики частотных спектров поляризации УНЧ шума.

ВВЕДЕНИЕ

Хорошо известно, что ионосфера представляет собой резонатор для альфвеновских волн — ионосферный альфвеновский резонатор (ИАР), который обуславливает существование резонансной структуры спектра фонового магнитного ультранизкочастотного (УНЧ) шума в диапазоне 0,1 ÷ 15 Гц [1–3]. На среднеширотном пункте «Новая жизнь» (56,00° с. ш., 45,74° в. д.) был впервые обнаружен так называемый широкополосный спектральный максимум на частотах 2 ÷ 7 Гц [4, 5]. В работе [5] был предложен механизм формирования этого максимума, связанный с наличием долины в профиле электронной концентрации N_e между слоями E и F на высотах 120 ÷ 300 км [6].

Благодаря большим градиентам показателя преломления на границах, данная область обладает собственными резонансными свойствами, отличными от ионосферного альфвеновского резонатора, т. е. представляет собой так называемый ионосферный альфвеновский суб-резонатор (суб-ИАР). Именно эти свойства могут служить причиной появления широкополосного спектрального максимума. В работе [5] также было установлено, что, помимо максимума спектральной плотности энергии шума, влияние суб-ИАР обуславливает соответствующие крупномасштабные частотные вариации поляризационного параметра ε , который определяется как отношение

* l.ermakova@nirfi.unn.ru

правополяризованной компоненты шума к левополяризованной. В работе [7] исследовалось многообразие суточной динамики спектров параметра ε , однако из-за недостатка данных эти особенности не удалось связать с конкретными изменениями в профилях параметров ионосферной плазмы над точкой регистрации низкочастотных полей. 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 [8]. В работах [9, 10] такой характер спектров параметра ε был связан с влиянием суб-ИАР. В работе [7] был сделан вывод, что основным параметром спектра поляризации в области широкополосного спектрального максимума является граничная частота $f_{\text{ГР}}$, отделяющая области частот с левой (ниже $f_{\text{ГР}}$) и правой (выше $f_{\text{ГР}}$) поляризацией шума. Далее на основе численных расчётов было показано, что частота $f_{\text{ГР}}$ не зависит от горизонтальной неоднородности ионосферной плазмы вдоль трассы распространения низкочастотных волн и от направления на источник, а полностью определяется локальными свойствами ионосферы над точкой регистрации УНЧ полей. Это даёт возможность развивать методы диагностики параметров ионосферы на основе анализа экспериментальных и расчётных спектров поляризационного параметра. В работе [10] было высказано предположение, что часто наблюдающиеся изменения частоты $f_{\text{ГР}}$ связаны с сильной изменчивостью плазмы низкоширотной ионосферы на высотах суб-ИАР.

Как было сказано выше, до сих пор не удавалось объяснить наблюдаемые изменения динамики параметра ε конкретными изменениями профилей ионосферных параметров, т. к. до 2012 года ионозондовая станция не работала в режиме непрерывного мониторинга на низких частотах. В данной работе этот пробел восполнен на основе одновременного анализа низкочастотных данных и данных ионозондов, а также численных расчётов параметра ε , выполненных с использованием модели IRI-2012 и профилей электронной концентрации N_e , скорректированных по данным ионозондов. Определены изменения в профилях N_e , приводящие к вариациям в суточной динамике спектра поляризации фонового шума.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

В работе использованы данные по регистрации тангенциальных компонент магнитного фонового шума $H_{\text{СЮ}}$ и $H_{\text{ВЗ}}$ на среднеширотных пунктах «Новая жизнь» (Нижегородская область, Россия) и «Мошири» (Япония), а также данные ионозондов, расположенных в Нижегородской области (30 км от пункта «Новая жизнь») и в Японии (ст. «Вакканай», $45,00^\circ$ с. ш. $141,7^\circ$ в. д.). Для обработки данных станции «Новая жизнь» были выбраны два летних периода 2013 и 2014 годов и осенний период 2012 года. Выделялись соседние сутки с разной динамикой и разной величиной характерных параметров спектров поляризации.

Обработка заключалась в построении спектров амплитуды магнитных компонент и поляризационного параметра на временном интервале 10 с с последующим усреднением $80 \div 100$ спектральных реализаций, что соответствует усреднению по $15 \div 20$ мин. Амплитудные спектры строились для контроля уровня локальной грозовой активности. Как известно [11], локальные грозы могут маскировать влияние суб-ИАР, но на спектры параметра ε локальная грозовая активность влияет только для ближних гроз (расстояния менее 80 км до источника). На рис. 1 приведены спектрограммы параметра поляризации, вычисленного по формуле:

$$\varepsilon = \frac{|H_{\text{R}}|/|H_{\text{L}}| - 1}{|H_{\text{R}}|/|H_{\text{L}}| + 1}. \quad (1)$$

Здесь $H_{\text{R}} = (H_{\text{СЮ}} + iH_{\text{ВЗ}})/\sqrt{2}$, $H_{\text{L}} = (H_{\text{СЮ}} - iH_{\text{ВЗ}})/\sqrt{2}$, $H_{\text{СЮ}}$ и $H_{\text{ВЗ}}$ — компоненты магнитного

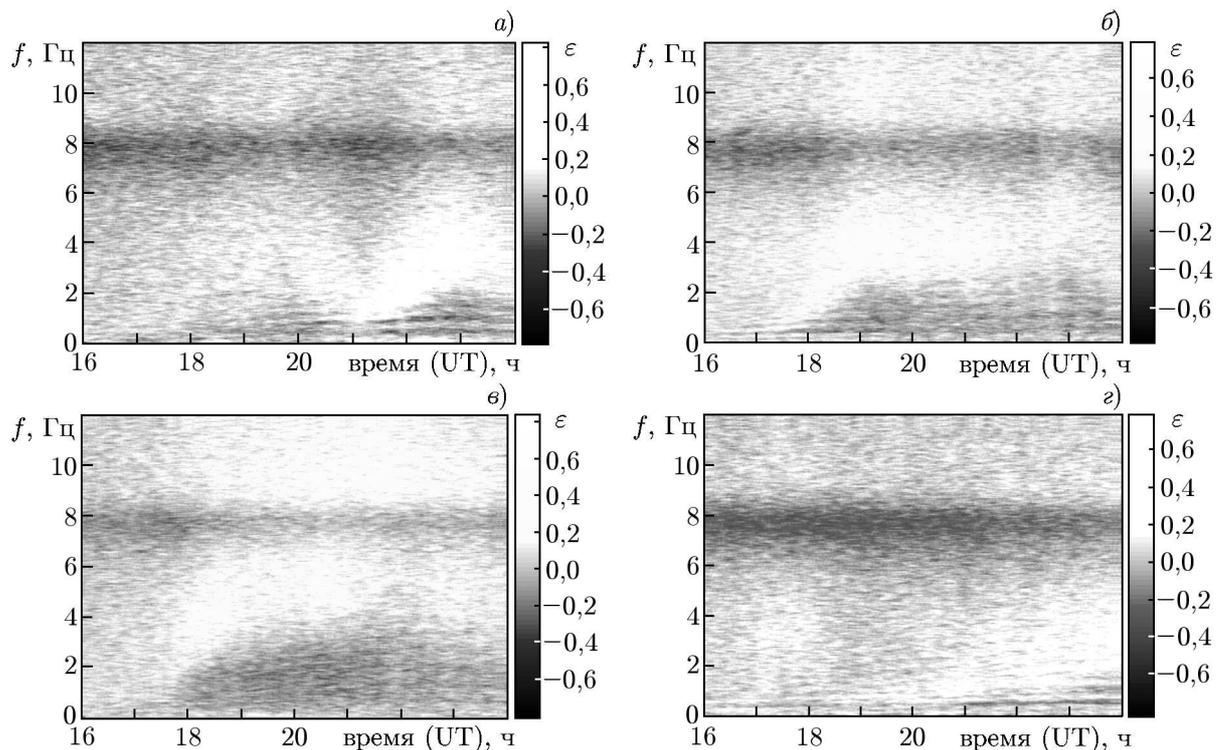


Рис. 1. Спектрограммы поляризационного параметра ε , построенные по низкочастотным данным станции «Новая жизнь» за 19 (а), 20 (б), 30 (в) и 31 (г) июля 2013 года

поля, ориентированные вдоль линии север—юг и восток—запад.

Из рис. 1 видно, что спектр ε имеет характерную особенность в тёмное время суток, когда поляризационный параметр меняет знак при определенном значении частоты $f = f_{\text{ГР}}$ (в данном случае она находится в пределах $0,5 \div 2,5$ Гц). Положительные значения ε соответствуют преобладанию правополяризованного излучения в шумовом фоне, отрицательные значения — преобладанию левой поляризации. На рис. 1 значения граничной частоты на всех спектрограммах меньше, чем частота первого шумановского резонанса ($f_{\text{Ш}}$). Однако так бывает не всегда: например, в зимнее время в годы минимума солнечной активности значения $f_{\text{ГР}}$ могут быть больше частоты $f_{\text{Ш}}$. Кроме того, влияние суб-ИАР распространяется и на более высокий частотный диапазон даже в случае, когда $f_{\text{ГР}} < f_{\text{Ш}}$. В спектре параметра ε это проявляется положительными значениями ε на частотах больше $f_{\text{Ш}}$ (см. рис. 1). Влияние шумановского резонанса (отрицательные значения ε) сказывается на спектре ε только в узком частотном диапазоне вблизи частоты 7,8 Гц, поэтому мы исследуем спектры поляризации и на частотах выше $f_{\text{Ш}}$. Как показано в работе [7], граничная частота $f_{\text{ГР}}$ совпадает с частотой широкополосного максимума в амплитудных спектрах магнитных компонент. Сравнительный анализ низкочастотных данных станции «Новая жизнь» показывает различную динамику спектров поляризационного параметра 19 и 20 июля и 30 и 31 июля 2013 года. Сразу после захода Солнца (17:26 UT) и до 19:00 UT 19.07.2013 отсутствовала характерная для тёмного времени суток особенность в спектре ε с нарастающим по времени значением $f_{\text{ГР}}$, такая, как имевшая место 20 июля.

Характер спектра поляризации в это время похож на дневной, т. е. 19.07.2013 не наблюдалось резкой границы в спектре ε при заходе Солнца. После 19:30 UT в спектре ε появились крупномасштабные вариации с изменением знака этого параметра, причём значение $f_{\text{ГР}}$ в спектрограмме имело довольно резкий нисходящий тренд. Минимальная величина $f_{\text{ГР}}$ регистрировалась около

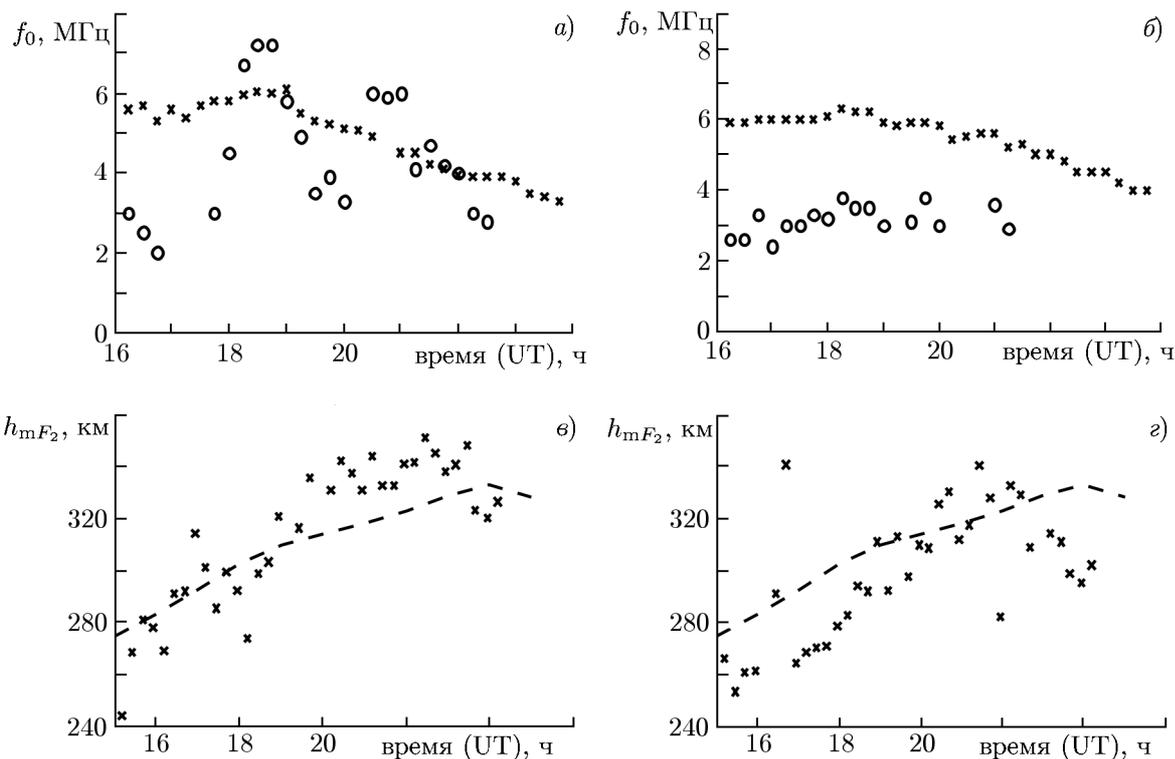


Рис. 2. Данные ионозодовых измерений в Нижегородской области за 19 (а, в) и 20 (б, г) июля 2013 года. На панелях (а) и (б) кресты соответствуют частоте f_{0F_2} , круги — частоте f_{0E_s} , штриховые линии на панелях (в, г) отвечают расчётам по модели IRI-2012

21:00 UT и примерно равнялась 0,8 Гц, после чего наблюдалось увеличение частоты $f_{ГР}$ до значений $2,0 \div 2,2$ Гц. В сутки 20.07.2013 спектр ϵ имел совершенно иной характер: сразу после захода Солнца появлялась частотная зависимость с изменением знака ϵ , при этом значение граничной частоты нарастало до значений $3,0 \div 3,5$ Гц. Спектры за 30 и 31 июля также сильно различаются: 30.07.2013 после захода Солнца наблюдались крупномасштабные вариации частотной зависимости параметра ϵ с частотой $f_{ГР}$, возрастающей до 4 Гц; 31.07.2013 до 19:30 UT в спектре ϵ отсутствовала особенность с изменением знака поляризационного параметра, абсолютные величины ϵ практически во всём частотном диапазоне составляли менее 0,1. Это, по нашему мнению, может говорить о том, что влияние суб-ИАР не проявляется в спектрах поляризации из-за возросшей оптической толщины ионосферных слоёв на высотах от 80 до 300 км.

Для определения причин разной суточной динамики спектров параметра ϵ 19 и 20 июля проанализируем данные измерений ионозонда в Нижегородской области за эти временные интервалы. На основе этих данных были построены временные зависимости критической частоты максимума слоя F , f_{0F_2} , критической частоты слоя E_s , f_{0E_s} (если такие слои существовали), и высоты положения максимума слоя F , h_{mF_2} .

На рис. 2 и 3 представлены данные ионозонда, расположенного в 30 км от станции «Новая жизнь».

Сравнительный анализ данных ионозонда позволяет сделать вывод, что наиболее сильные различия для исследуемых периодов наблюдались в величинах плазменных частот спорадических слоёв E_s . Отсутствие характерной для тёмного времени суток частотной зависимости параметра ϵ до 19:00 UT 19.07.2013 и до 20:00 UT 31.07.2013 совпадало по времени с наблюдением очень сильных спорадических слоёв с критическими частотами $f_{0E_s} > 7 \div 9$ МГц. Нисходящий тренд в

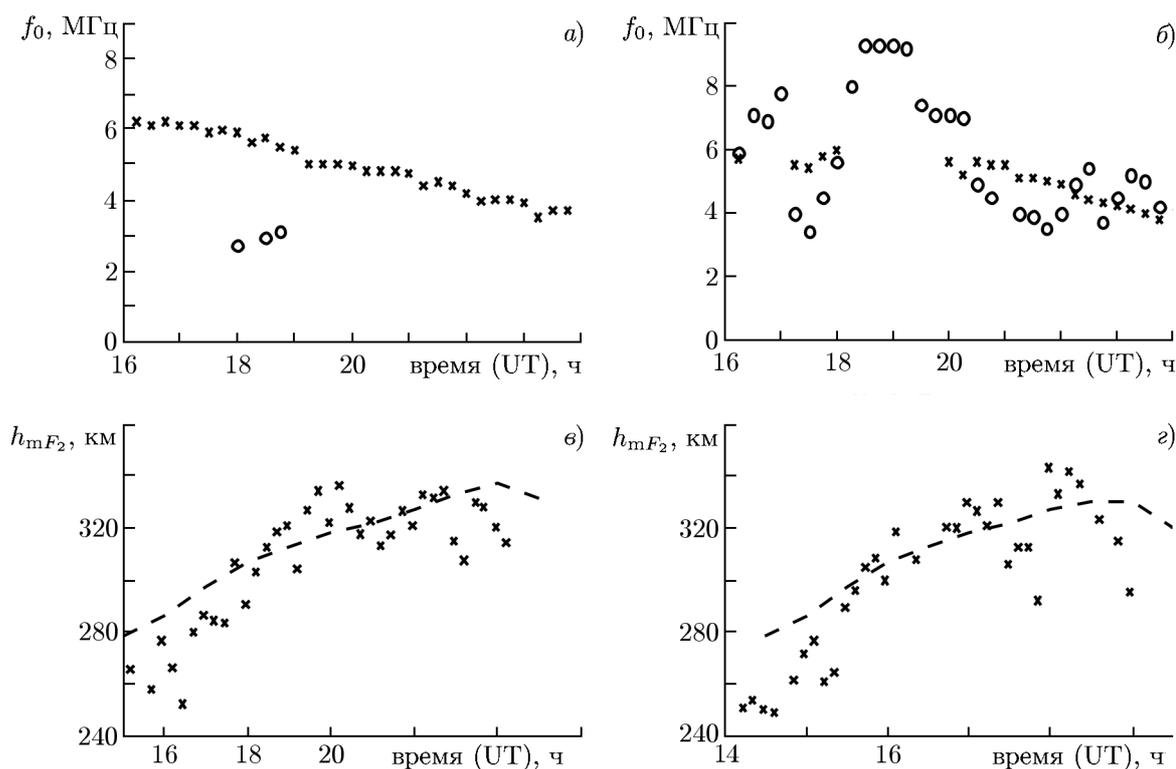


Рис. 3. То же, что на рис. 2, для 30 (а, в) и 31 (б, г) июля 2013

динамике частоты $f_{\text{ГР}}$ 19.07.2013 и минимум $f_{\text{ГР}}$ около 21:00 UT коррелирует с возрастанием плазменной частоты спорадического слоя E_s с 3,5 до 6 МГц. После 20:00 UT 31.07.2013 в спектре поляризационного параметра появлялась особенность с изменением его знака, но с гораздо меньшими значениями $f_{\text{ГР}}$ (1÷2 Гц), чем 30.07.2013 (3÷4 Гц). При этом 31 июля после 20:00 UT наблюдались спорадические слои с критическими частотами $f_{0E_s} = 4,0 \div 5,5$ МГц, в то время, как 30 июля спорадические слои были обнаружены только в период с 18:00 до 19:00 UT. Нужно также отметить, что резких различий в динамике других параметров ионограмм (f_{0F_2} и h_{mF_2}) обнаружено не было, за исключением более высоких значений величины высоты максимума слоя F 19.07.2013 с 19:00 до 22:00 UT, что, как будет показано в следующем разделе, может дополнительно привести к уменьшению граничной частоты.

Таким образом, возникновение сильных спорадических слоёв коррелировало с изменением суточной динамики спектра параметра ε , которое заключалось либо в уменьшении частоты $f_{\text{ГР}}$, либо в полном исчезновении характерной для тёмного времени суток частотной зависимости ε . Вообще говоря, анализ низкочастотных данных за другие временные интервалы, когда были зарегистрированы сильные слои E_s , практически всегда показывал подобные вариации в спектрах поляризационного параметра. В данной работе мы не приводим статистический анализ корреляции между изменениями частотной зависимости поляризационного параметра и образованием слоёв E_s , поскольку экспериментальные результаты подтверждались численными расчётами спектра ε для моделей электронной концентрации с учётом наличия тонких слоёв E_s .

Приведём также данные со среднеширотной станции «Мошири», которые обнаруживаются резкое изменение в суточной динамике поляризационного параметра, связанное с влиянием слоёв E_s . Надо отметить, что анализ низкочастотных данных в разные сезоны показал, что на этой

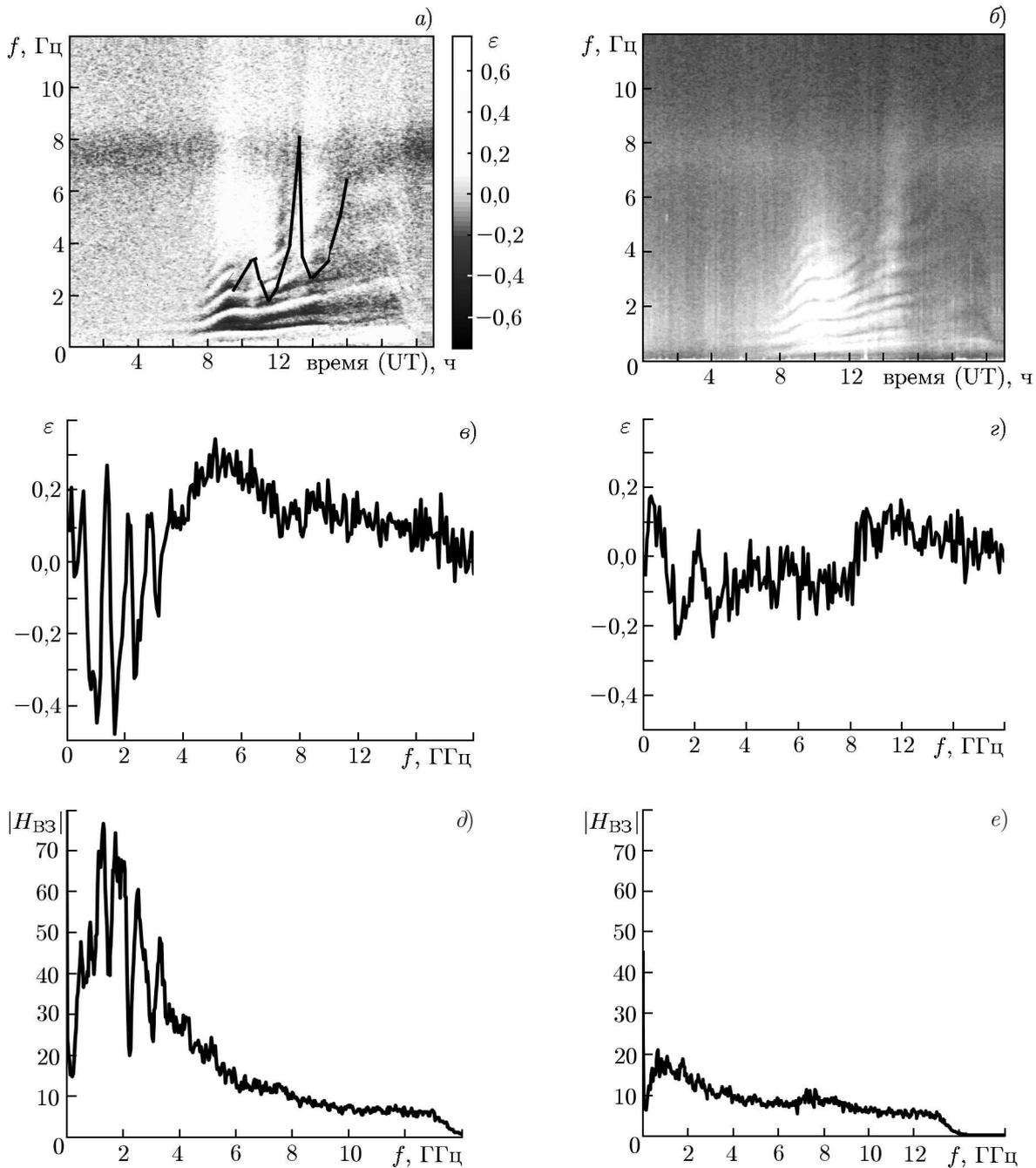


Рис. 4. Спектрограммы поляризационного параметра (а) и амплитуды магнитной компоненты $H_{ВЗ}$ (б), спектры ϵ для разных временных интервалов (в, г), спектры компоненты $H_{ВЗ}$ для разных временных интервалов (д, е). На панели (б) светлые области соответствуют более интенсивным вариациям $H_{ВЗ}$, панели (в, д) построены для интервала времени 9:30÷9:40 UT, панели (г, е) — для интервала 16:00÷16:10 UT

станции сильно выражена сезонная зависимость спектров ϵ : наблюдается резкое увеличение граничной частоты и уменьшение глубины осциллирующего поляризационного параметра в осенние и зимние месяцы, что связано, по-видимому, с малой оптической толщиной ионосферных слоев на высотах суб-ИАР в эти периоды. Для анализа были выбраны сутки, когда наблюдалось резкое

изменение характера поляризации.

Результаты построения спектров поляризационного параметра для этой станции приведены на рис. 4. Из него видно, что спектр ε сильно изменялся в течение тёмного времени суток (заход Солнца в 08:15 UT): уменьшение величины $f_{\text{ГР}}$ до $2 \div 4$ Гц в период с 08:40 до 12:00 и с 13:00 до 14:00 UT сопровождалось увеличением абсолютной величины ε до значений $0,3 \div 0,45$. Это связано с ростом добротности суб-ИАР и увеличением глубины осциллирующих резонансной структуры спектра. Для наглядности значения $f_{\text{ГР}}$ нанесены на спектрограмме ε тонкой линией. Увеличение абсолютной величины ε , связанное с влиянием суб-ИАР, как демонстрируют спектры ε (рис. 4в, з), приводит к увеличению абсолютной величины средних значений поляризационного параметра в период с 08:40 до 14:00 UT до $0,15 \div 0,30$. Это особенно хорошо заметно для частот выше 4 Гц, где отсутствует резонансная структура спектра. В этот период наблюдается также резкий рост (в $2 \div 3$ раза) амплитуды магнитной компоненты $H_{\text{ВЗ}}$ на частотах $2 \div 4$ Гц (см. рис. 4б, д, е). Надо также отметить, что это возрастание не связано с повышением интенсивности экваториальных грозных очагов, т. к. при этом не наблюдалось заметного увеличения амплитуды магнитной компоненты на частотах первого шумановского резонанса. Такое резкое увеличение добротности суб-ИАР на средних широтах наблюдается не часто. После 16:00 UT происходило увеличение $f_{\text{ГР}}$ до значений $7 \div 8$ Гц с одновременным уменьшением глубины осцилляций.

Для интерпретации сильных вариаций в спектре ε проанализируем данные измерений ионозонда на японской станции «Вакканай», ближайшей к низкочастотной обсерватории «Мошири» (см. рис. 5). В период наблюдения спектров ε с низким значением граничной частоты регистрировалось появление спорадических слоёв E_s с критическими частотами от 3,0 до 5,5 МГц. Таким образом, так же, как и для станции «Новая жизнь», было обнаружено влияние спорадических слоёв E_s на суточную динамику параметра ε , причём одновременно с уменьшением граничной частоты наблюдалось резкое возрастание абсолютной величины ε .

Надо отметить, что спорадические изменения параметров спектра поляризации могут наблюдаться и в периоды отсутствия спорадических слоёв E_s . Нами были проанализированы спектрограммы ε за два временных интервала 23–24.10.2012 и 25–26.10.2012, построенные по низкочастотным данным пункта «Новая жизнь» (см. рис. 6). Суточная динамика спектра ε за эти два периода существенно различалась: 23–24.10.2012 значения $f_{\text{ГР}}$ были существенно ниже, чем 25–26.10.2012; 23–24.10.2012 наблюдалось два спорадических понижения граничной частоты до $1,2 \div 1,5$ Гц в 18:00 UT и после 24:00 UT; резкое увеличение значения $f_{\text{ГР}}$ наблюдалось 23–24.10 в интервале $22:30 \div 24:00$ UT, а 25–26.10 — в интервале $18:00 \div 19:00$ UT.

Анализ временной зависимости h_{mF_2} , построенной по данным ионозонда (см. рис. 6в), показывает, что практически на всём исследуемом интервале (тёмный период от захода Солнца в 13:34 UT до восхода Солнца в 03:45 UT) значения h_{mF_2} 23–24 октября были больше, чем в аналогичные часы 25–26 октября. Спорадические уменьшения $f_{\text{ГР}}$ 23–24 октября соответствуют периодам с резким увеличением h_{mF_2} с 280 до 330 км около 18:00 UT и с 310 до 345 км около 24:00 UT. Период резкого увеличения частоты $f_{\text{ГР}}$ ($22:00 \div 24:00$ UT) отвечает, наоборот, падению высоты максимума слоя F . Таким образом, резкие изменения h_{mF_2} 23–24 октября корре-

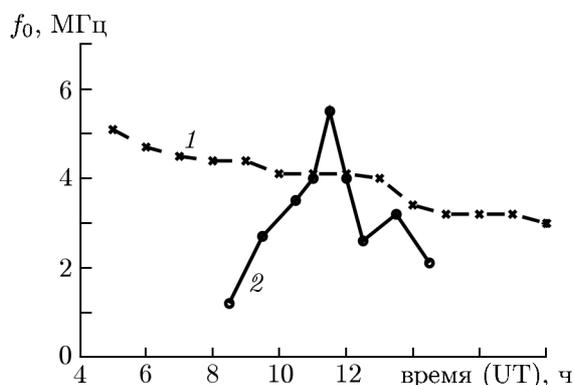


Рис. 5. Данные ионозонда на станции «Вакканай» за исследуемый временной интервал 19.09.2008: критическая частота f_{0F_2} (кривая 1) и f_{0E_s} (кривая 2)

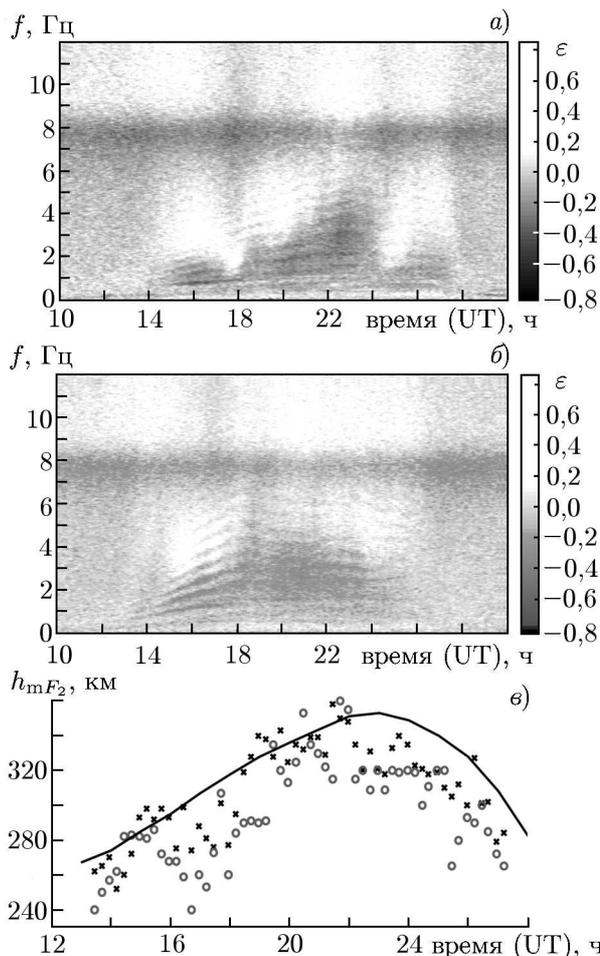


Рис. 6. Спектрограммы параметра ϵ за 23–24.10.2012 (а) и 25–26.10.2012 (б), временной ход высоты максимума слоя F, построенный по измерениям ионозонда и модели IRI-2012 (в). На панели (в) кресты соответствуют данным за 23–24.10.2012, круги — 25–26.10.2012, сплошная линия — модели IRI-2012

сотах 80÷300 км.

2. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

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 [13, 14]. Продольная и поперечная компоненты магнитного поля вычисляются по следующим формулам:

$$H_\varphi = \frac{Il \sqrt{D_S}}{4\pi ah(1)} \left[\hat{h}_L^{-1}(2)^{\theta\theta} + \frac{h_{Sm\theta\varphi}}{h_{Sm\theta\theta}} \hat{h}_L^{-1}(2)^{\theta\varphi} \right] \text{ctg}\left(\frac{r}{2a}\right),$$

лируют с вариациями граничной частоты в спектре параметра ϵ . Поэтому можно предположить, что в рассматриваемом временном интервале, скорее всего, именно высота h_{mF_2} определяла изменения оптической толщины резонатора. Однако вариации электронной концентрации N_e на высотах слоя E и долины могут также быть ответственны за изменения характера спектра ϵ . Резкое увеличение граничной частоты 25–26 октября после 18:00 UT связано, по нашему мнению, именно с уменьшением оптической толщины резонатора за счёт падения N_e на высотах слоя E и долины (h_{mF_2} в это время существенно не меняется). Также в период с 19:00 до 20:00 UT 25–26 октября произошло резкое увеличение высоты h_{mF_2} , которое не привело к заметному изменению параметров спектра ϵ , что может быть, по нашему предположению, также связано с компенсирующим это увеличение изменением профиля N_e на высотах слоя E и долины. Данные о профилях N_e на этих высотах в тёмное время суток, как правило, невозможно получить по измерениям ионозонда. Выполнение численного моделирования спектра ϵ по известным моделям ионосферных параметров с учётом результатов измерений критических частот f_{0F_2} , f_{0E_s} и высоты h_{mF_2} и сравнение полученных спектров с экспериментальными позволяет скорректировать профили N_e и получить адекватные измеренным спектры ϵ . В следующем разделе путём подгонки расчётных спектров поляризационного параметра магнитных УНЧ полей к экспериментальным получены дополнительные сведения о особенностях профиля электронной концентрации на вы-

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

Здесь I — токовый момент источника, a — радиус Земли, r — расстояние от источника до приёмника по геодезической линии, \hat{h}_L^{-1} — матрица, обратная матрице индуктивной высоты (она связана с матрицей поверхностного импеданса анизотропной неоднородной ионосферы), \hat{h}_{S_m} — матрица, полученная симметризацией \hat{h}_L^{-1} и усреднением по всем точкам трассы от источника до приёмного пункта, D_S — детерминант матрицы \hat{h}_{S_m} , $h(1)$ — высота нижней границы ионосферы в точке источника, цифра (2) означает, что компоненты матрицы \hat{h}_L^{-1} определяются в точке приёмного пункта, формулы для вычисления матриц \hat{h}_L^{-1} и \hat{h}_{S_m} приведены в работах [12, 15]. Надо отметить, что использование решения для сферического волновода, полученного в работе [12], позволяло учитывать горизонтальную неоднородность ионосферы вдоль трассы распространения УНЧ волн. Однако, строго говоря, эти формулы справедливы для частот ниже частоты первого шумановского резонанса, поэтому особенности шумановского резонанса в амплитудных и поляризационных спектрах расчётных полей не учтены. Но, как показал анализ экспериментальных спектров фонового шума, влияние шумановского резонанса меняет характер поляризации в узком частотном диапазоне около основной частоты $f_{\text{Ш}}$. Приведённые ниже результаты расчётов также показывают, что выше частоты $f_{\text{Ш}}$ модельные спектры параметра ε адекватно описывают характер экспериментальных спектров ε .

Параметр ε вычисляется по формуле (1). При расчётах предполагалось, что направление на источник лежит в плоскости магнитного меридиана. Это оправдано, поскольку в работе [7] показано, что характеристики спектра ε не зависят существенно от направления на источник. Необходимые для расчётов профили ионосферных параметров (концентрации электронов и ионов разных типов, а также температура нейтральных молекул) выбирались на основе международного стандарта ионосферы (International Reference Ionosphere, IRI-2012) и атмосферы (MSIS-E-00 Atmosphere Model). Также при расчётах использовались скорректированные по измерениям ионозондов профили электронной концентрации на высотах 80 ÷ 350 км. Поскольку включение спорадических слоёв E_s в модель IRI-2012 не предусмотрено, мы задавали модельный спорадический слой коррективкой электронной концентрации N_e на высотах этого слоя. Максимальная концентрация в слое E_s вычислялась по данным ионозондовых измерений. Учитывая, что значения электронной концентрации задавались с шагом в 5 км, минимальное значение толщины слоя E_s , которому отвечало максимальное значение измеренной ионозондом концентрации, составляло 10 км. Поэтому для задания более тонких спорадических слоёв определялось некоторое эффективное значение N_e для слоя с толщиной в 10 км, оптическая толщина которого для нормальных волн в ионосфере была бы равна оптической толщине реального слоя E_s нужной толщины. Оптическая толщина вычислялась по набегу фазы нормальной низкочастотной волны на толщине слоя E_s . При расчётах предполагалось, что толщина слоя E_s составляет 2 ÷ 5 км.

На рис. 7 приведены спектры параметра ε , рассчитанные для модели IRI с учётом и без учёта спорадического слоя E_s . Величина электронной концентрации в слое E_s была выбрана по данным ионозонда ($f_{0E_s} = 6$ МГц). На этом же рисунке показаны высотные профили показателя преломления одной из нормальных волн в ионосферной плазме (для частоты $f = 2$ Гц). Как видно из рис. 7, наличие тонкого, но интенсивного слоя E_s может существенно менять характер спектра поляризационного параметра. Появление слоя E_s привело к резкому уменьшению граничной частоты с 7,3 до 1,2 Гц. Это связано с дополнительным вкладом этого слоя в оптическую толщину суб-ИАР. Также надо обратить внимание на увеличение абсолютной величины параметра ε , что означает рост добротности резонатора, связанный с повышением коэффициента отражения низкочастотных волн от его нижней границы.

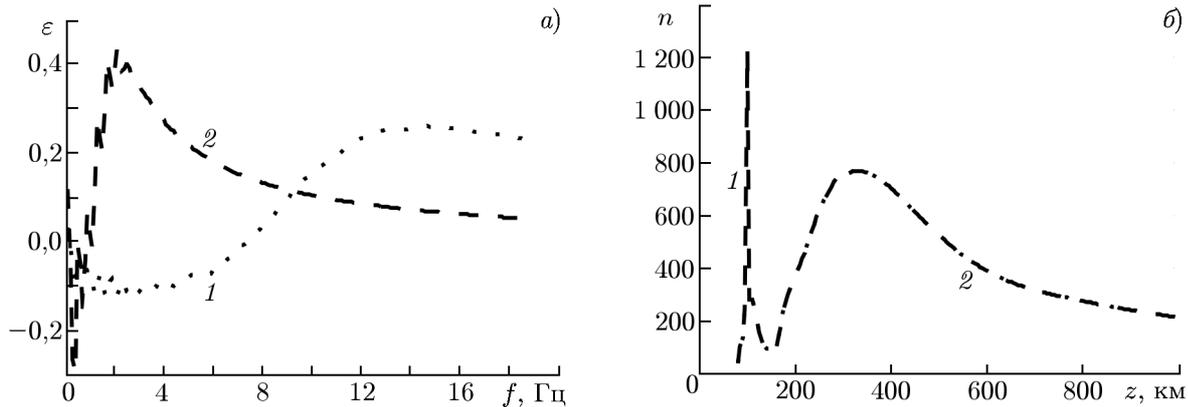


Рис. 7. Модельные спектры ε (а) и высотные профили показателя преломления нормальной моды, переходящей в альфвеновскую волну в бесстолкновительном пределе (б). Кривая 1 соответствует расчётам по модели IRI-2012, кривая 2 — модели IRI-2012 с учётом спорадических слоёв (на панели (б) кривые различаются только в узкой области высот 100÷110 км), на кривой 1 отсутствует резкий пик на высотах около 100 км

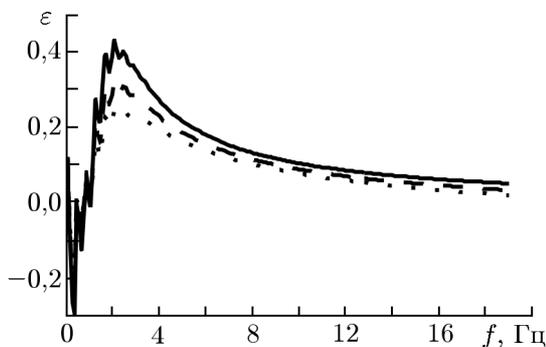


Рис. 8. Спектры параметра ε для случая, когда слой E_s расположен на высоте 100 км (сплошная линия), 110 км (штриховая линия) и 115 км (пунктир)

Модельные расчёты показывают, что глубина вариаций в спектре поляризационного параметра может зависеть от высоты положения слоя E_s . Спорадические слои, расположенные ниже максимума электронной концентрации на высотах слоя E , приводят к существенному увеличению добротности резонатора (см. рис. 8). В то же время от положения слоя E_s не зависит оптическая толщина ионосферных слоёв в долине между E - и F -областями, которая определяет значение $f_{гр}$. На рис. 9 приведены расчётные спектрограммы поляризационного параметра за 19.07.2013 и 30.07.2013, построенные по модели IRI-2012.

Следует также отметить, что рассчитанные по модели IRI-2012 спектрограммы параметра ε за 30.07 и 31.07 не имеют видимых различий, поэтому спектрограмма за 31.07.2012 не приводится. Как видно из сравнения рис. 9 и 1, расчётные спектрограммы кардинальным образом отличаются от экспериментальных в те сутки (19 и 31 июля), когда наблюдались наиболее интенсивные спорадические слои E_s . Но даже в ситуации, когда слои E_s отсутствовали (например, 30.07.2013), основной параметр этих спектров $f_{гр}$ был существенно больше, чем для экспериментальных данных. Поэтому мы учтём данные ионозондовых измерений h_{mF_2} и соответствующим образом скорректируем профили электронной концентрации.

На рис. 10 приведены модельные спектры параметра ε для 20:00 UT 30.07.2013 для модели IRI-2012 без корректировок, для этой же модели, но с учётом значений высоты h_{mF_2} , полученных по измерениям ионозонда, и для скорректированных на высотах слоя E профилей электронной концентрации N_e . Значение $f_{гр}$ для основного профиля модели IRI-2012 составляет почти 8 Гц, в то время как экспериментальное значение $f_{гр}$ для этого периода порядка 3 Гц. Моделирование спектра ε с учётом значения высоты h_{mF_2} , полученного по измерениям ионозонда (340 км), даёт уменьшение $f_{гр}$ до 6 Гц. Таким образом, увеличение высоты максимума слоя F может приводить к росту оптической толщины резонатора за счёт увеличения протяжённости долины. Для

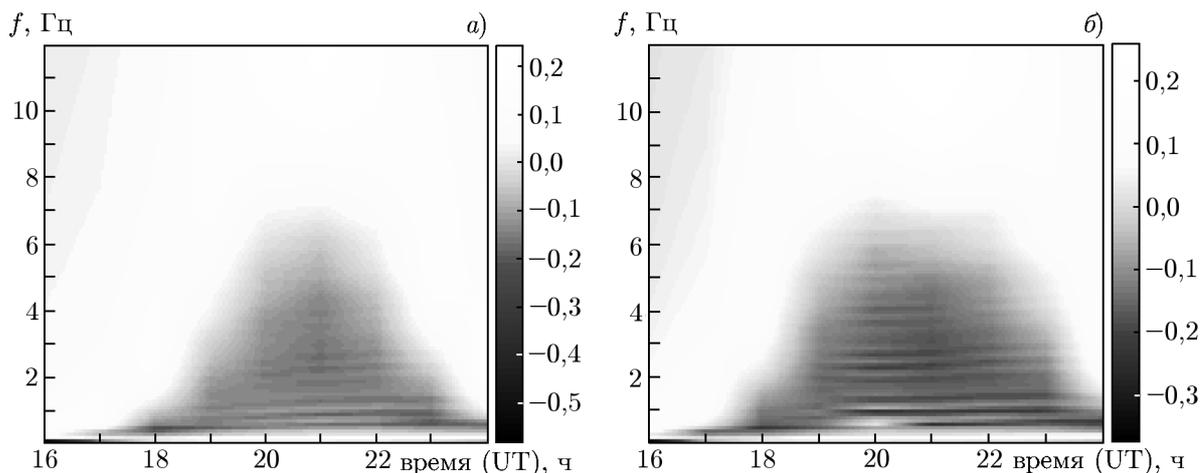


Рис. 9. Спектрограммы параметра ϵ , построенные по модели IRI-2012

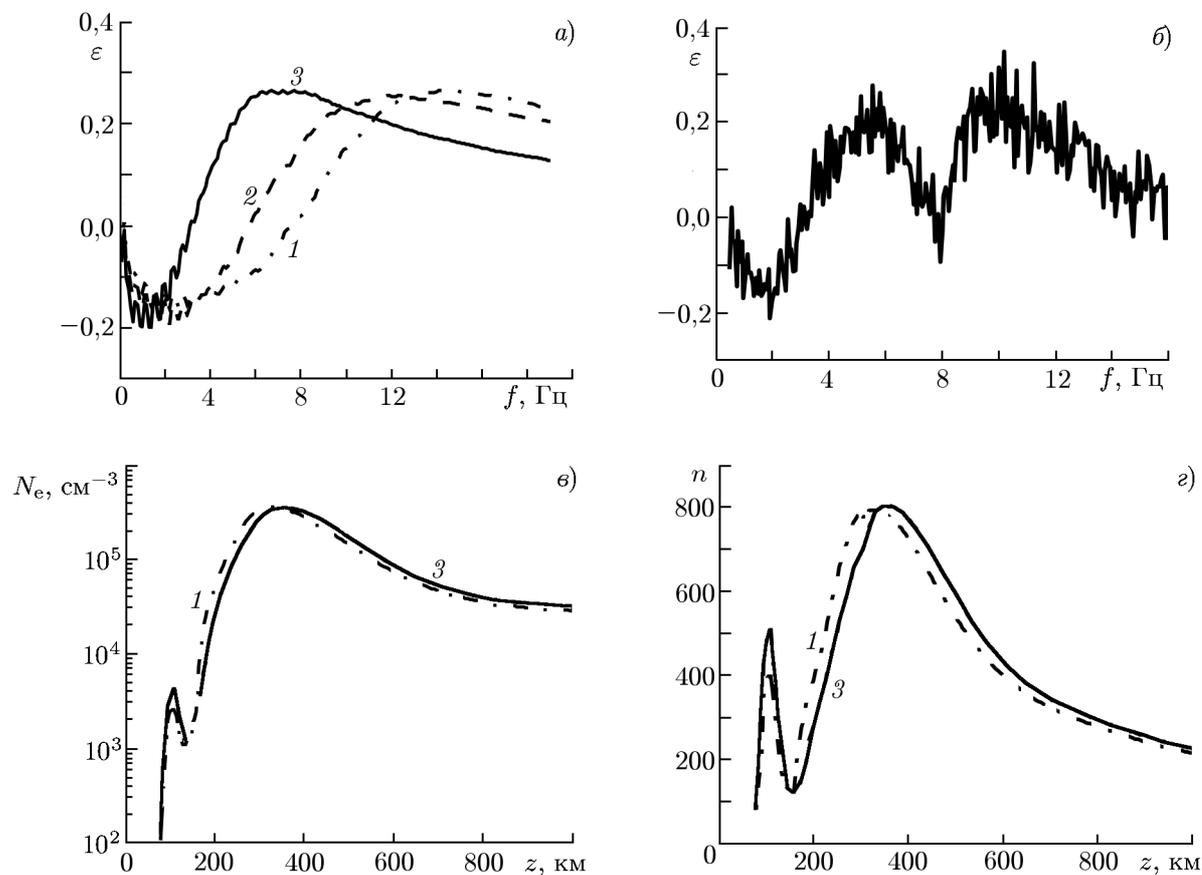


Рис. 10. Модельные (а) и экспериментальные (б) спектры поляризационного параметра и модельные профили N_e (в) и показателя преломления для частоты 1 Гц (г). Кривая 1 соответствует расчётам по модели IRI-2012, кривая 2 — по модели IRI-2012 со скорректированным значением h_{mF2} , кривая 3 — модели IRI-2012 со скорректированными значениями h_{mF2} и концентрации N_e в слое E и в долине между слоями E и F

того, чтобы удовлетворить экспериментальным значениям $f_{Гр}$ после корректировки профиля N_e на высотах слоя F, потребовалось дальнейшее изменение этого профиля уже на высотах слоя

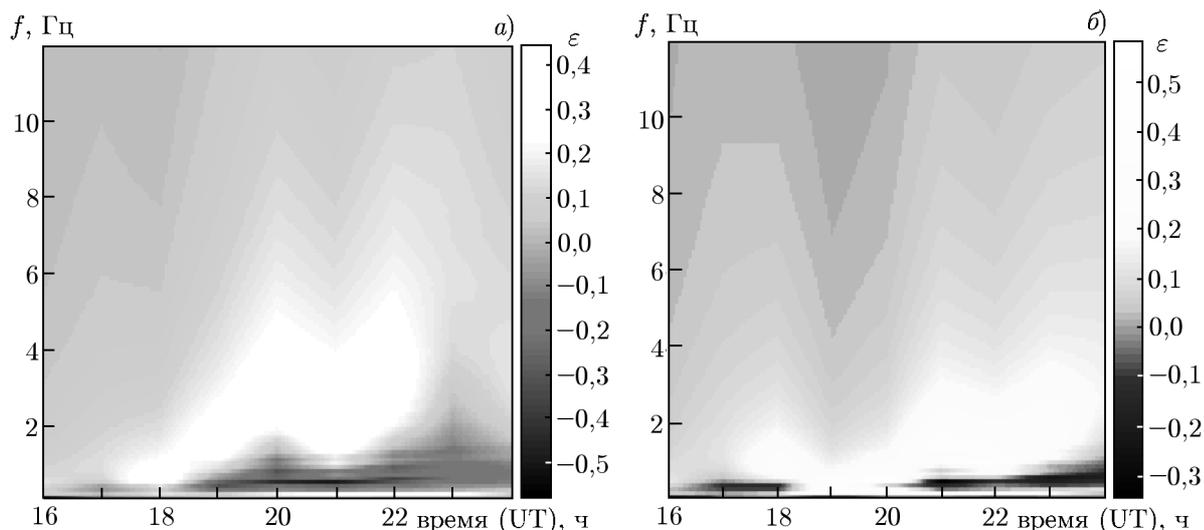


Рис. 11. Модельные спектрограммы в периоды регистрации сильных спорадических слоёв E_s 19.07.2013 (а) и 31.07.2013 (б)

E и долины. Дополнительное равномерное увеличение значений N_e только на высотах слоя E позволило получить согласующиеся с наблюдениями спектры ε с частотой $f_{гр}$ порядка 3 Гц (см. рис. 10). Для наглядности на нижней панели рис. 10 также приведены профили электронной концентрации N_e и профили показателя преломления низкочастотной волны, соответствующие модельным спектрам ε .

На рис. 11 даны модельные спектрограммы, которые построены по скорректированным по данным ионозонда профилям электронной концентрации: учтены появления спорадических слоёв E_s и скорректированы высоты h_{mF_2} . Как видно из сравнения рис. 1 и рис. 11, эти спектрограммы более адекватно отражают характер экспериментальных спектров ε и динамику граничной частоты. Поскольку сильных различий в динамике высоты максимума слоя F за 19 и 20.07.2013 и 30 и 31.07.2013 обнаружено не было (см. рис. 2 и рис. 3), то можно считать, что именно появление сильных слоёв E_s определило характер вариаций спектров ε 19.07.2013 и 31.07.2013. Модельные спектрограммы адекватно отразили падение значения $f_{гр}$ до 1 Гц около 21:00 UT 19.07.2013 и отсутствие частотной зависимости ε со сменой его знака в интервале от 18:00 до 20:00 UT 31.07.2013.

Численные расчёты, выполненные для среднеширотной станции «Мошири», также подтвердили влияние слоёв E_s на поляризационные спектры фонового шума. На рис. 12 приведены результаты этих расчётов для модельных профилей на основе IRI-2012 и скорректированных профилей N_e при возникновении слоёв E_s .

По характеру спектра параметра ε можно сделать вывод, что модель IRI адекватно описывает профили электронной концентрации на этой станции при отсутствии спорадических слоёв. В экспериментальных спектрах также наблюдаются большие значения $f_{гр}$ (выше частоты первого шумановского резонанса) (см. рис. 4). Появление слоёв E_s резко уменьшает значения $f_{гр}$, при этом может увеличиваться и добротность суб-ИАР. По данным измерений ионозонда на станции «Вакканай» слои E_s регистрировались на высоте 100 км, при этом частота f_{0E_s} около 11:00 UT составляла примерно 4 МГц (см. рис. 5). Вычисления спектров ε для 11:00 UT с учётом такой интенсивности спорадического слоя и толщины слоя порядка 2,3 км позволили получить значения $f_{гр}$, близкие к экспериментальным (около 3 Гц) (см. рис. 12б). Как демонстрируют спектры на этом рисунке, наличие слоёв E_s наиболее сильно увеличивает добротность суб-ИАР, если спо-

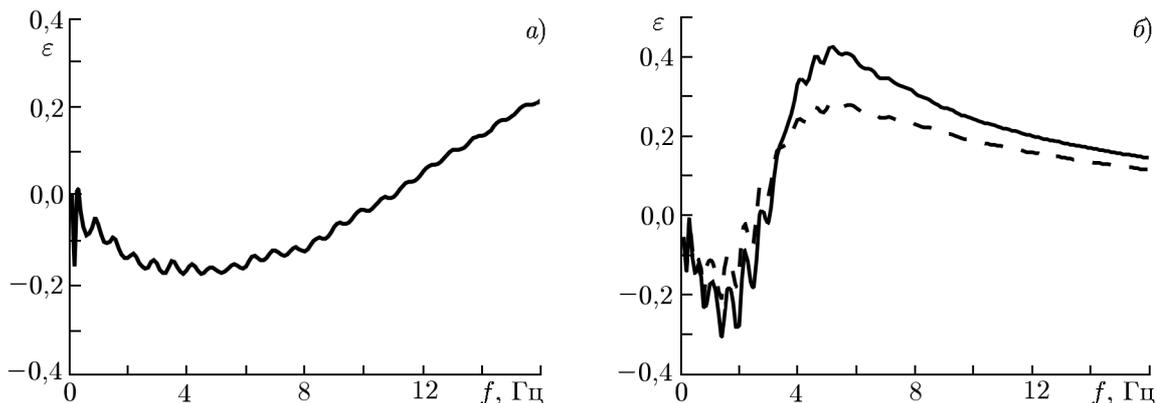


Рис. 12. Модельные спектры параметра ϵ для станции «Мошири» в 11:00 UT 19.09.2009. Спектр на панели (а) рассчитан по модели IRI-2012, спектр на панели (б) — по модели IRI-2012 с учётом спорадического слоя на высоте 100 км (сплошная кривая) и 115 км (штриховая кривая)

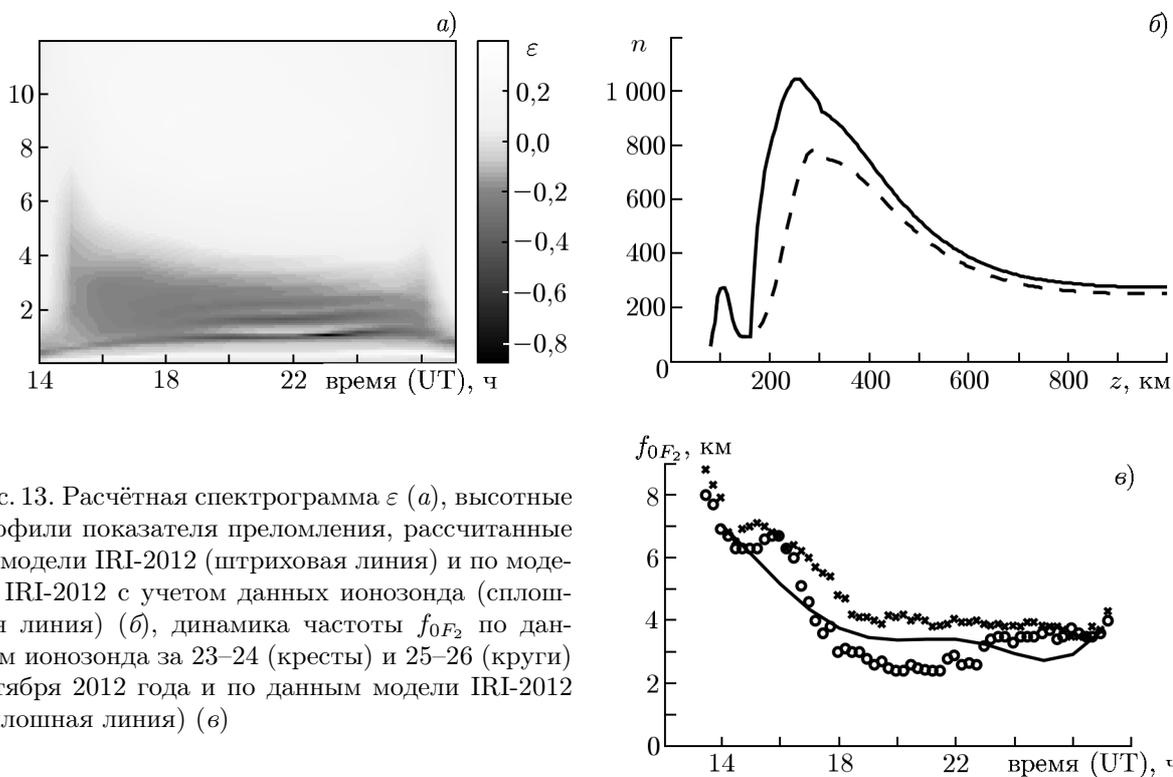


Рис. 13. Расчётная спектрограмма ϵ (а), высотные профили показателя преломления, рассчитанные по модели IRI-2012 (штриховая линия) и по модели IRI-2012 с учетом данных ионозонда (сплошная линия) (б), динамика частоты f_{0F_2} по данным ионозонда за 23–24 (кресты) и 25–26 (круги) октября 2012 года и по данным модели IRI-2012 (сплошная линия) (в)

радикальный слой расположен ниже максимума слоя E .

Исследуем теперь причины сильной изменчивости спектров параметра ϵ в осенний магнитоспокойный период 23–26.10.2012, когда отсутствовали спорадические слои E_s . На рис. 13а приведена спектрограмма ϵ , вычисленная для нескорректированных модельных профилей IRI-2012 за 23.10.2012. Динамика расчётного спектра имеет совершенно иной характер, чем динамика экспериментальных спектров (см. рис. 6): с 15:00 до 22:00 UT в расчётной спектрограмме наблюдается плавное снижение $f_{гр}$ до 4 Гц, в то время как в экспериментальных спектрограммах имеет место, в основном, восходящий тренд значений $f_{гр}$ с резким спорадическим понижением $f_{гр}$ в отдельные периоды 23–24 октября. Согласно модели IRI, концентрация на высотах E -области и долины менялась незначительно. Поэтому изменения расчётных спектров определялись динамикой высоты

h_{mF_2} (см. рис. 6в) и f_{0F_2} (см. рис. 13в). Как показали расчёты, уменьшение концентрации в максимуме слоя F , как и увеличение высоты h_{mF_2} , приводит к увеличению протяжённости долины (см. рис. 13б, в) и уменьшению частоты $f_{гр}$. Плавный характер изменения $f_{гр}$ со временем в модельной спектрограмме связан с отсутствием резких вариаций в динамике f_{0F_2} и h_{mF_2} . Данные ионозонда, наоборот, свидетельствуют о резких изменениях в высотах h_{mF_2} , которые, как было показано ранее, коррелируют со спорадическими понижениями частоты $f_{гр}$.

Анализ динамики высоты h_{mF_2} для модели IRI-2012 и для данных ионозонда (см. рис. 6в) показывает, что, например, для временного интервала 16:00÷17:00 UT 25.10.2012 модельные высоты были существенно больше, чем экспериментальные значения h_{mF_2} . В то же время значение $f_{гр}$, полученное при вычислении спектра ε для времени 16:00 UT по модели IRI, было выше, чем для экспериментальных спектров (см. рис. 14а, б).

После корректировки профиля N_e с учётом измеренных значений h_{mF_2} и f_{0F_2} был, как и следовало ожидать, получен спектр ε с ещё большим значением граничной частоты. Это позволяет сделать предположение, что электронная концентрация N_e на высотах слоя E и долины в этот период была существенно выше, чем модельная. Корректировка профилей N_e (равномерное увеличение в 2,5 раза) на этих высотах позволила максимально приблизить расчётные спектры к экспериментальным (см. рис. 14а, б). Анализ динамики значений граничной частоты в экспериментальной спектрограмме 23.10.2012 во временном интервале 17–19:00 UT (см. рис. 6а) показывает, что $f_{гр}$ составляла 1,5÷3,0 Гц и спорадически понижалась около 18:00 UT. Для этого временного интервала профили N_e были скорректированы, как с учётом измеренных значений f_{0F_2} и h_{mF_2} , так и на высотах слоя E и долины, чтобы удовлетворить экспериментальным значениям $f_{гр}$ (см. рис. 14з, е, з). Полученные с помощью такой подгонки значения электронной концентрации на высоте слоя E и долины существенно не менялись в течение интервала 17:00÷18:00 UT, но были существенно (в 2,6 раза) выше, чем для модели IRI. Сравнительный анализ значений электронной концентрации N_e на высотах слоя E и долины, для которых были построены спектры параметра ε (см. рис. 14в, д), и данных измерений ионозонда для 17:00 UT и 18:00 UT (расчёты проводятся для конкретного часа) позволил сделать вывод, что падение частоты $f_{гр}$ около 18:00 UT было обусловлено резким ростом h_{mF_2} и одновременным уменьшением f_{0F_2} . Такой же анализ для интервала 18:00÷19:00 UT показывает, что на фоне практически постоянных значений f_{0F_2} и слабо возрастающих величин h_{mF_2} резкий рост значений граничной частоты связан с двукратным падением концентрации N_e на высотах слоя E и долины (рис. 14ж, з). Надо отметить, что корректировка модельных профилей IRI по измеренным значениям f_{0F_2} и h_{mF_2} не привела к существенному изменению спектров ε для 18:00 UT и 19:00 UT, поэтому на рис. 14д, ж линии, отвечающие модели IRI-2012 и модели IRI-2012, откорректированной по измеренным значениям параметров слоя F_2 , практически не различимы.

Аналогично можно предположить, что резкое увеличение частоты $f_{гр}$ 25.10.2012 в интервале 18:00÷19:30 UT (см. рис. 6б), которое наблюдается при постоянных h_{mF_2} (см. рис. 6в) и уменьшающихся значениях критической частоты слоя F (см. рис. 13в), связано с резким падением электронной концентрации на высотах слоя E и долины.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнительный анализ низкочастотных данных и данных ионозондов, расположенных в Нижегородской области (Россия) и в Японии позволил исследовать причины спорадических и долговременных вариаций спектра поляризации фонового магнитного шума ε в диапазоне частот 0,1÷14 Гц. Было показано следующее:

- 1) суточные спектры параметра ε с низким значением граничной частоты $f_{гр} \approx 1\div 3$ Гц

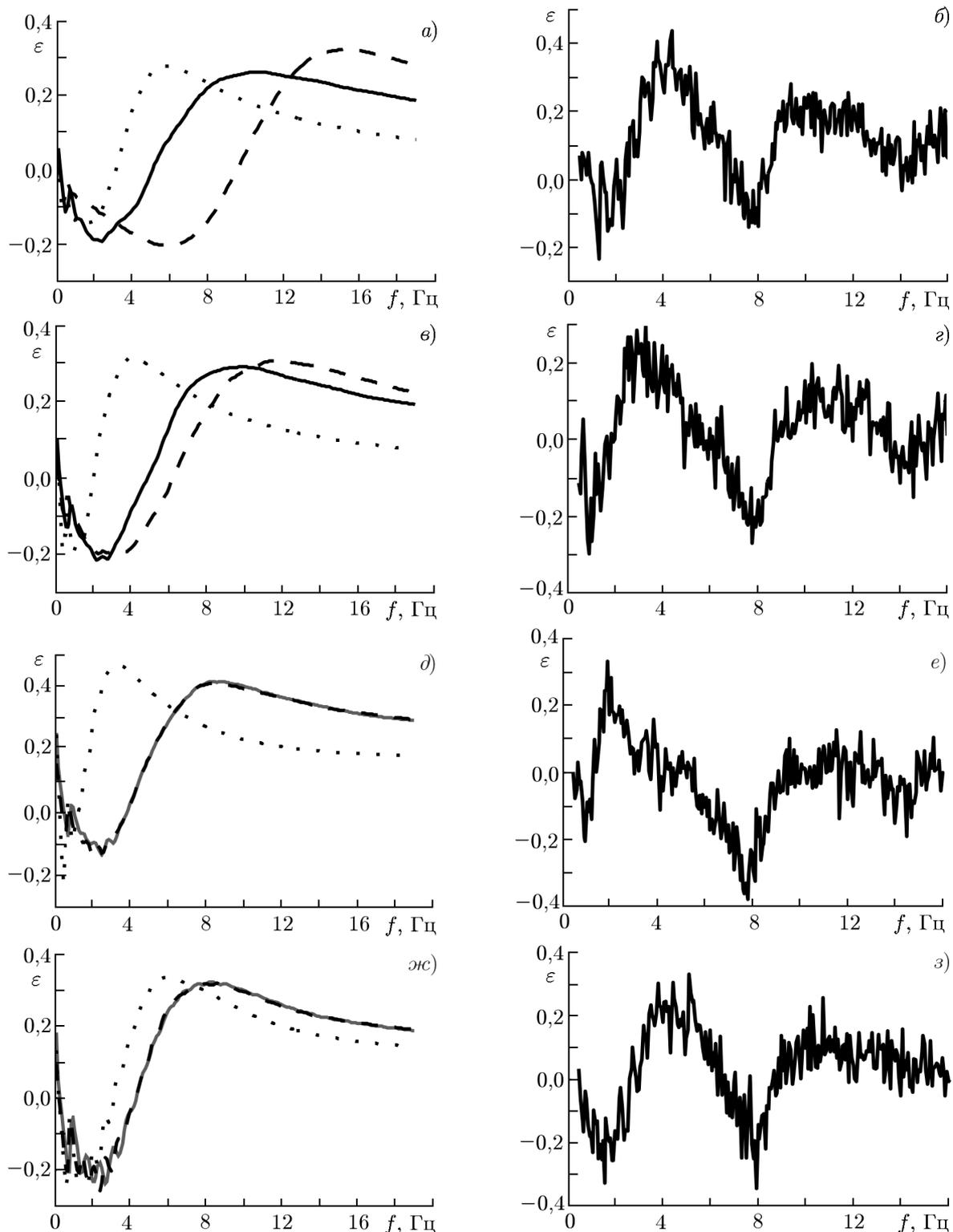


Рис. 14. Расчётные спектры ε для модельных профилей IRI и профилей, скорректированных по измерениям ионозонда (а, в, д, ж), экспериментальные спектры ε (б, г, е, з). Сплошные линии соответствуют расчётам по модели IRI-2012, штриховые — по модели IRI-2012 со скорректированными значениями h_{mF_2} и f_{0F_2} , пунктирная — по модели IRI-2012 со скорректированными значениями h_{mF_2} , f_{0F_2} и N_e

наблюдались при появлении спорадических слоёв E_s с критической частотой $f_{0E_s} > 3 \div 5$ МГц;

2) в случае отсутствия спорадических слоёв суточные спектры ϵ с более низким значением граничной частоты $f_{гр}$ (при сравнении низкочастотных данных за соседние сутки) наблюдались при более высоких значениях h_{mF_2} ;

3) спорадические изменения в суточной динамике спектра ϵ , характеризующиеся резким понижением $f_{гр}$, сопровождались увеличением h_{mF_2} и появлением слоёв E_s , а резкие возрастания значений $f_{гр}$ в отсутствие спорадических слоёв E_s были связаны с резким уменьшением электронной концентрации на высотах слоя E и долины;

4) на примере данных станции «Мошири» продемонстрирована связь между возникновением слоя E_s и возрастанием амплитуды магнитных компонент и абсолютной величины параметра ϵ ; эти эффекты, вероятно, связаны с резким увеличением добротности суб-ИАР за счёт отражения волн от слоя E_s ;

5) возникновение спорадических слоёв с $f_{0E_s} > 8 \div 9$ МГц коррелировало с исчезновением проявления структуры суб-ИАР в спектрах ϵ .

Были выполнены численные расчёты спектра поляризационного параметра на базе модели IRI-2012 и с заданием дополнительного модельного слоя E_s . Они показали, что слой E_s с толщиной $2 \div 5$ км с критической частотой $f_{0E_s} > 3 \div 5$ МГц может приводить к резкому уменьшению $f_{гр}$ в спектрах поляризационного параметра ϵ и даже к исчезновению его частотной зависимости со сменой знака (это связано с сильным увеличением оптической толщины резонатора). Также обнаружена зависимость спектра поляризационного параметра от высоты расположения и толщины слоя E_s . На основе сравнения экспериментальных и расчётных спектров выполнена корректировка модельных профилей электронной концентрации, которая позволила добиться совпадения расчётных и экспериментальных значений частоты $f_{гр}$.

Проведённые исследования могут быть полезны при изучении изменений ионосферных параметров на высотах $80 \div 350$ км в периоды сильных магнитных бурь, которые приводят к появлению сильных слоёв E_s и возрастанию концентрации электронов на высотах слоя E для среднеширотных станций.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 13-02-00723, 15-42-02544-р_поволжье_a, 13-05-12091-офи_м, 13-02-12074-офи_м,).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляев П. П., Поляков С. В., Рапопорт В. О., Трахтенгерц В. Ю. // Докл. АН СССР. 1987. Т. 297, № 4. С. 840.
2. Беляев П. П., Поляков С. В., Рапопорт В. О., Трахтенгерц В. Ю. // Изв. вузов. Радиофизика. 1989. Т. 32, № 7. С. 802.
3. Böisinger T., Haldoupis C., P.P. Belyaev P. P., et al. // J. Geophys. Res. A. 2002. V. 107, No. 10. P. 1281.
4. Беляев П. П., Поляков С. В., Ермакова Е. Н. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2002. Т. 45, № 2. С. 156.
5. Ермакова Е. Н., Котик Д. С., Поляков С. В., Щенников А. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 7. С. 607.
6. Titheridge J. E. // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 2003. V. 65, no. 9. P. 1035.
7. Ермакова Е. Н., Котик Д. С., Рябов А. В. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 10–11. С. 671.
8. Böisinger T., Shalimov S. L. // Ann. Geophysicae. 2004. V. 22, No. 6. P. 1989.

9. Böisinger T., Demekhov A. G., Haldoupis C. // Abstracts of XXXII Annual Seminar "Physics of Auroral Phenomena". Apatity, Russia, 3–6 March 2009, P. 54.
10. Böisinger T., Demekhov A. G., E. N. Ermakova E. N., et al. // J. Geophys. Res. 2014. V. 119, No. 5. P. 4109
11. Ермакова Е. Н., Котик Д. С., Рябов А. В., Панютин А. А. // Изв. вузов. Радиофизика. 2014. Т. 57, № 11. С. 875.
12. Кириллов В. В., Копейкин В. Н. // Изв. вузов. Радиофизика. 2003. Т. 46, № 1. С. 1.
13. Ермакова Е. Н., Котик Д. С., Поляков С. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2008. Т. 51, № 7. С. 575.
14. Böisinger T., Ermakova E. N., Haldoupis C., Kotik D. S. // Ann. Geophysicae. 2009. V. 27. P. 1313.
15. Ермакова Е. Н., Поляков С. В., Семёнова Н. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2011. Т. 54, № 12. С. 881.

Поступила в редакцию 15 декабря 2015 г.; принята в печать 11 июня 2016 г.

EFFECT OF THE IONOSPHERIC PARAMETER VARIATIONS AT ALTITUDES OF 80–350 km ON DIURNAL DYNAMICS OF THE ULF MAGNETIC FIELD SPECTRA AT MIDLATITUDES

E. N. Ermakova, D. S. Kotik, A. V. Pershin, V. A. Pilipenko, and K. Shiokawa

We study the causes of sporadic and long-term variations in the polarization spectrum of the ultralow-frequency (ULF) magnetic background noise at midlatitudes. Data records of low-frequency horizontal magnetic components at the midlatitude observatory of the Radiophysical Research Institute "Novaya Zhizn" (56° N, 45.74° E) and the Japanese station Moshiri (44.37° N, 142.27° E) were used. Ionosonde data from the sites located in Russia (station Vasilsursk) and in Japan (station Wakkanai) were also analyzed. The effect of the sporadic E_s layers on the frequency spectrum of noise polarization was detected. It is shown that the appearance of quite intense sporadic E_s layers with the cutoff frequencies $f_{0E_s} > 3\text{--}5$ MHz can significantly alter the polarization spectrum parameters, which is due to variations in the optical depth and Q factor of the sub-ionospheric Alfvén resonator (sub-IAR) formed by the valley between the E and F regions. Numerical simulation of the polarization parameters of the background noise using the IRI-2012 model corrected by the ionosonde data confirmed that the E_s layer about 5 km thick, with the cutoff frequencies $f_{0E_s} > 3\text{--}5$ MHz, may lead to a sharp decrease in the boundary frequency f_b between the frequency ranges of the left- and right-hand polarized noise, or even to a complete disappearance of the sub-IAR manifestation in the polarization parameter spectrum. Numerical calculations have also revealed the impact of the altitude position of the E_s layer on the Q factor of the sub-IAR. The effect of variations in the altitude and cutoff frequency of the F -layer maximum, as well as the electron density at the altitudes of the E layer and the valley on the features of the daily dynamics of the ULF noise polarization spectra is discussed.