

**ВЛИЯНИЕ ИОНОСФЕРНЫХ РЕЗОНАТОРОВ НА СУТОЧНУЮ ДИНАМИКУ
СПЕКТРАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЕРВОГО ШУМАНОВСКОГО РЕЗОНАНСА
ПО ДАННЫМ МЕРИДИОНАЛЬНОЙ СЕТИ УНЧ-МАГНИТОМЕТРОВ**

**INFLUENCE OF IONOSPHERIC RESONATORS ON DAILY DYNAMICS
OF THE FIRST SCHUMANN RESONANCE SPECTRAL PARAMETERS ACCORDING
TO DATA FROM A MERIDIONAL CHAIN OF ULF MAGNETOMETERS**

Е.Н. Ермакова *Научно-исследовательский радиофизический институт
ННГУ,
Нижний Новгород, Россия, l.ermakova@nirfi.unn.ru***А.В. Рябов** *Научно-исследовательский радиофизический институт
ННГУ,
Нижний Новгород, Россия, alexr@nirfi.unn.ru***E.N. Ermakova***Radiophysical Research Institute, NNGU,
Nizhny Novgorod, Russia, l.ermakova@nirfi.unn.ru***A.V. Ryabov***Radiophysical Research Institute, NNGU,
Nizhny Novgorod, Russia, alexr@nirfi.unn.ru*

Аннотация. Экспериментально исследовано влияние локальной ионосферы, а именно ионосферного альфвеновского резонатора (ИАР) и нижнего ионосферного резонатора на высотах 80–300 км (суб-ИАР), на амплитуду и поляризацию первой моды шумановского резонанса. Исследования были выполнены на основе спектрального анализа данных одновременного мониторинга компонент магнитного УНЧ-шума на меридиональной цепи станций, включающей высокоширотные станции «Баренцбург» и «Ловозеро», среднеширотную обсерваторию «Новая Жизнь» НИРФИ ННГУ (Нижегородская область) и низкоширотную станцию в Израиле. Наряду с этими данными были задействованы данные мониторинга в обсерватории «Борок» и на о. Крит. Обнаружено, что в темное время суток наблюдались значительные вариации в спектре поляризационного параметра ϵ на частоте первого шумановского резонанса (ШР). Эти вариации имели разный характер в разных обсерваториях. Анализ суточной динамики параметра ϵ показал, что изменения ϵ связаны с влиянием локальных суб-ИАР, имеющих разную оптическую толщину и добротность в местах расположения этих обсерваторий. Обнаружено, что влияние суб-ИАР на поляризацию в полосе ШР зависит от соотношения граничной частоты f_{tr} , разделяющей отрицательную и положительную поляризации магнитного УНЧ-шума, и частоты первого ШР. Влияние ИАР на поляризацию и амплитуду УНЧ-колебаний магнитных полей в частотной полосе первого шумановского резонанса было обнаружено только на ст. «Новая Жизнь» и «Ловозеро»: высокодобротный альфвеновский резонатор в ионосфере мог приводить к изменению ширины частотной полосы первого ШР и к смещению его центральной частоты. Анализ УНЧ-данных обсерваторий, разнесенных на расстояния 400 км, показал, что локальный характер влияния ионосферных резонаторов может приводить к разнице в амплитудных характеристиках первого ШР даже на таких расстояниях. Показано

Abstract. We have experimentally studied the influence of the local ionosphere, namely the ionospheric Alfvén resonator (IAR) and the lower ionospheric resonator at altitudes 80–300 km (sub-IAR) on the amplitude and polarization of the first Schumann resonance. The study is based on spectral analysis of data from simultaneous monitoring of ULF magnetic noise components at a meridional chain of stations: high-latitude stations Barentsburg and Lovozero, mid-latitude observatory NNGU NIRFI (NL, Nizhny Novgorod Region), a low-latitude station in Israel. We have also used monitoring data from the Borok and Crete observatories. At the stations in dark conditions, significant variations were found in the spectrum of the polarization parameter ϵ at the frequency of the first Schumann resonance (SR). Moreover, these variations had different character at different observatories. Analysis of the daily dynamics of the parameter ϵ has shown that these variations are associated with the influence of local sub-IAR having different optical thickness and quality factor at these observatories. The influence of sub-IAR on polarization in the SR band was found to depend on the ratio of the boundary frequency f_b (the frequency that separates the negative and positive polarization of ULF magnetic noise) to the frequency of the first SR. The IAR influence on the polarization and amplitude of magnetic fields in the frequency band of the first Schumann resonance was discovered only at the NL and Lovozero stations: a high-quality Alfvén resonator in the ionosphere above the NL station could cause the SR frequency band to change and its central frequency to shift. Analysis of low-frequency data from the observatories separated by distances of 400 km has revealed that the influence of local ionospheric resonators can lead to a difference in the amplitude characteristics of the first SR even at such distances. It has also been shown that the influence of the IAR and sub-IAR resonators on the azimuthal angle of the magnetic field vector in the frequency band of the first SR is less noticeable and can generate variations in this parameter by 10°–20°. Numerical

также, что влияние ИАР и суб-ИАР на азимутальный угол вектора магнитного поля в частотной полосе первого ШР менее заметно и может приводить к вариациям этого параметра на 10° – 20° . Численные расчеты, выполненные для модели сферического волновода, позволили адекватно интерпретировать особенности суточной динамики параметра ϵ в полосе первого ШР.

Ключевые слова: ионосферные резонаторы, магнитный шум, шумановский резонанс, поляризация, спектральные параметры, резонансная структура спектра.

calculations performed for the spherical waveguide model made it possible to adequately interpret the features of the daily dynamics of the parameter ϵ in the frequency range of the first SR.

Keywords: ionospheric resonators, magnetic noise, Schumann resonance, polarization, spectral parameters, resonance spectral structure.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, шумановский резонанс (ШР) возникает на собственных частотах полости земля–ионосфера при возбуждении ее планетарной грозовой активностью и имеет глобальный характер. Шумановские резонансы связаны с колебаниями в полости земля–ионосфера с основной частотой около 8 Гц и модами более высокого порядка, отстоящими друг от друга примерно на 6 Гц. Исследование спектральных характеристик магнитного шума на частотах ШР проводилось во многих работах и, как правило, для анализа использовались четырехлетние и годовые усредненные данные. В работах [Satori, Zieger, 1996; Price, Melnikov, 2004; Greenberg, Price, 2007] исследовались суточные и сезонные вариации амплитуды, центральной частоты и добротности магнитного поля в полосе первых трех ШР в обсерваториях в Венгрии и Израиле. В работе [Schlegel, Fullekrug, 2000] впервые были изучены суточные вариации параметров ШР по данным, полученным в двух противоположных точках разных полушарий, в Антарктиде и Гренландии. Обнаружены 12- и 8-часовые периоды в вариациях амплитуды ШР на обеих станциях, а также ее изменение в зависимости от времени года. В работе [Roldugin et al., 2004] исследовался суточный ход частоты первой моды ШР по наблюдениям в трех пунктах, расположенных на Шпицбергене, Кольском п-ове и Камчатке. Колебания частоты составили 0.2–0.3 Гц во всех обсерваториях. В частотном ходе преобладали полусуточные периоды. Изменение контролировалось местным (LT), а не мировым (UT) временем. Частота компоненты север–юг (СЮ) имела максимумы примерно в 07:00 и 19:00 LT. Суточный ход частоты компоненты восток–запад (ВЗ) обнаруживал противофазное поведение, так что максимум частоты компоненты ВЗ приходится на ~01:00 и 13:00 LT. Во всех перечисленных работах подчеркивается, что, поскольку ШР представляют собой электромагнитное явление в атмосфере Земли, связанное с глобальной молниевой активностью, вариации его параметров могут быть индикатором активности глобальных грозовых очагов в Юго-Восточной Азии, Африке и Южной Америке. На основе долговременной регистрации компонент магнитного УНЧ-шума в полосах шумановского резонанса был проведен ряд исследований суточных вариаций параметров

ШР, которые были связаны с изменениями положения грозовых очагов по всему земному шару [Ogawa et al., 1969; Nickolaenko, Rabinowicz, 1995; Nickolaenko et al., 1998].

Важным параметром ШР является поляризация магнитных полей в соответствующих частотных полосах, которая характеризуется коэффициентом эллиптичности и азимутальным углом большой оси эллипса поляризации. Экспериментальные исследования поляризационных параметров проводились на низких [Sentman, 1987], средних [Русаков, Бакастов, 1988] и высоких [Ролдугин, Васильев, 2012] широтах. Во всех случаях была обнаружена эллиптическая поляризация УНЧ-колебаний магнитных полей на частотах первого и второго ШР, причем в течение суток коэффициент поляризации мог изменяться от положительного до отрицательного. На средних (обсерватория «Борок») и высоких широтах (обсерватории «Баренцбург» и «Ловозеро») выявлен преимущественно левый характер поляризации на частоте первого ШР (левая поляризация соответствует направлению вращения вектора поля в ту же сторону, в которую вращаются положительно заряженные частицы в геомагнитном поле в Северном полушарии, что соответствует вращению вектора поля против часовой стрелки). В работе [Колосков и др., 2005] приведены результаты поляризационного мониторинга первых трех мод ШР в Антарктиде. Исследовались усредненные по четырем периодам солнечного цикла суточные вариации коэффициента эллиптичности по данным 2001–2003 гг. Обнаружена высокая степень эллиптичности первой моды ШР с положительными значениями коэффициента поляризации в пределах 0.4–0.8. В этой же работе на основе решения задачи о возбуждении шумановских резонансов показано, что вектор поляризации магнитных УНЧ-полей в полосе первой моды ШР при возбуждении грозовыми экваториальными источниками должен вращаться по часовой стрелке в Южном полушарии и против часовой стрелки в Северном полушарии.

В работе [Bösinger, Shalimov, 2004] на рис. 1 приведены вариации поляризационного параметра за несколько дней октября 1999 г. на станции о-ва Крит, наиболее заметные в темное время суток. В статье комментируются изменения поляризации в диапазоне до 6 Гц, однако этот рисунок показывает, что вариации коэффициента эллиптичности в частотной

полосе первого ШР наиболее ярко выражены в это же время. В статье [Bosinger et al., 2014] на основе анализа численных расчетов горизонтальных УНЧ-полей от наземного источника объясняются сильные вариации степени эллиптичности магнитного УНЧ-поля в темное время суток, вызванные влиянием нижнего ионосферного резонатора (суб-ИАР) на низких широтах. Суб-ИАР возникает при сильной вариации показателя преломления низкочастотных волн в ночное время на высотах от нижней границы ионосферы (~70–80 км) до нижней границы F-слоя (250–300 км), связанной с так называемой долиной в высотном профиле электронной концентрации. Вследствие больших градиентов показателя преломления на границах данной области вся структура в целом обладает собственными резонансными свойствами, отличными от ИАР, и, в частности, может служить причиной появления широкополосного спектрального максимума (ШСМ) в амплитудах горизонтальных компонент фонового шума на частотах 1–6 Гц [Ермакова и др., 2007]. Согласно работам [Ермакова и др., 2007, 2012], суб-ИАР влияет также на поведение поляризационного параметра ε (определение будет дано ниже) и приводит к характерной частотной зависимости этого параметра с изменением поляризации с левой на правую. В этих работах показано, что в случае наземного источника типа вертикального электрического диполя наиболее существенный вклад в формирование спектра поляризационного параметра дает локальная ионосфера, а характер частотной зависимости этого параметра мало зависит от направления на источник.

Поскольку появление заметных вариаций ε в частотной полосе первого ШР коррелирует с появлением вариаций на нижних частотах, то можно предположить, что локальная ионосфера также влияет на поляризационные параметры первого ШР. Таким образом, состояние локальной ионосферы может добавляться к глобальным факторам формирования поляризации ШР и существенно менять ее суточную динамику.

В настоящей работе исследуется влияние суперпозиции трех резонаторов: глобального сферического резонатора Шумана, нижнего ионосферного резонатора (суб-ИАР, высоты 80–300 км) и ионосферного альфвеновского резонатора (ИАР, высоты от 80 до 2000 км) — на особенности суточной динамики спектральных параметров УНЧ-шума в полосе частот первого шумановского резонанса. С целью определения локального характера суточных вариаций спектральных параметров первого ШР анализируются данные меридиональной магнитометрической сети. Для таких исследований не подходит метод усреднения данных за большие отрезки времени, поскольку усреднение нивелирует влияние изменчивой локальной ионосферы на параметры фонового шума. В работе выполнен анализ низкочастотных данных за отдельные суточные периоды, когда влияние локальных резонаторов в спектрах магнитного шума проявлялось наиболее отчетливо. Наряду с этим проведены модельные расчеты спектров поляризационного параметра ε для подтверждения влияния локального суб-ИАР на вариации ε в полосе первого ШР в темное время суток.

1. АНАЛИЗ ДАННЫХ НИЗКОЧАСТОТНОГО МОНИТОРИНГА НА МЕРИДИОНАЛЬНОЙ СЕТИ СТАНЦИЙ

В работе использовались данные регистрации горизонтальных компонент магнитного поля на меридиональной цепи станций, разнесенных на большие (1500–2000 км) расстояния: на высокоширотных станциях «Баренцбург» и «Ловозеро», в среднеширотной обсерватории НИРФИ «Новая Жизнь», Нижегородская обл., и на низкоширотной станции «Мицпе-Рамон» в Израиле. Использовались также данные одновременной регистрации в обсерваториях, разнесенных на 400 км («Новая Жизнь» и «Борок»), и данные станции на о-ве Крит. Буквенные обозначения и географические координаты станций приведены в таблице.

Станция	Географическая широта	Географическая долгота
Баренцбург (BAB)	78° N	14° E
Ловозеро (LOZ)	68° N	35° E
Новая Жизнь (NL)	56° N	45° E
Мицпе-Рамон (MR)	31° N	35° E
Борок (BOR)	58° N	38° E
Крит (CR)	35° N	25° E

Из таблицы видно, что станции разнесены сильно по широте и существенно меньше по долготе.

Данные регистрировались в частотной полосе 0.1–16 Гц с частотой оцифровки 32 Гц на высокочувствительные индукционные датчики (исключением являются данные на о-ве Крит — регистрация до 10 Гц). Обработка заключалась в построении спектров и спектрограмм поляризационных и амплитудных параметров на временном интервале 10 с и в их последующем усреднении на интервале 10–15 мин. Строилась и анализировалась также суточная динамика различных спектральных параметров магнитного шума на частоте первого шумановского резонанса. На рис. 1 приведены спектрограммы поляризационного параметра ε за период 23–27.10.2008 на ст. NL и за период 21–24.04.2004 на ст. CR. Величина ε зависит от отношения правополяризованной компоненты шума к левополяризованной:

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

Здесь $H_R = (H_{CЮ} + H_{B3})/\sqrt{2}$, $H_L = (H_{CЮ} - iH_{B3})/\sqrt{2}$ — соответственно право- и левополяризованные компоненты магнитного поля, $H_{CЮ}$ и H_{B3} — компоненты магнитного поля, ориентированные вдоль направления CЮ и B3. Правая поляризация соответствует направлению вращения вектора поля в ту же сторону, в которую вращаются отрицательно заряженные частицы. Значению $\varepsilon > 0$ соответствует

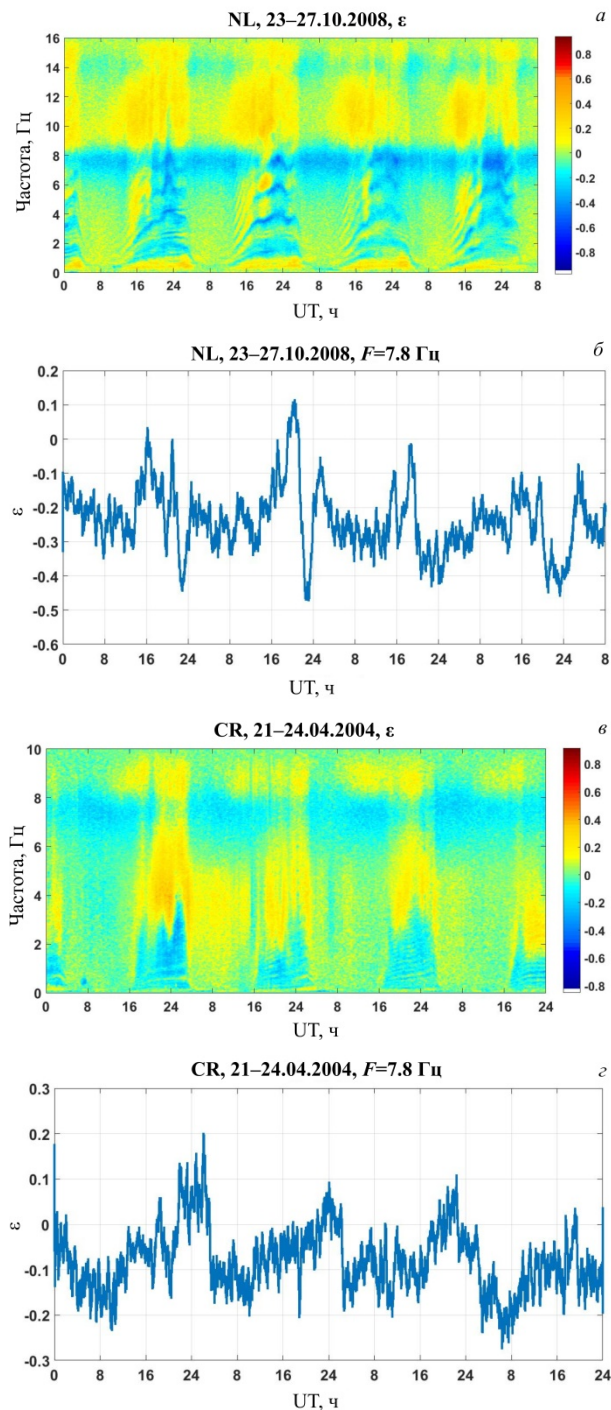


Рис. 1. Спектрограммы параметра ϵ на ст. NL и CR (а, в), динамика ϵ на частоте первого ШР за период 23–27.10.2008 на ст. NL (б) и за период 21–24.04.2004 на ст. CR (г)

правая поляризация, $\epsilon < 0$ — левая поляризация, $\epsilon = 0$ — линейная поляризация. Как видно из рис. 1, а, в, наиболее существенные вариации ϵ на частоте первого ШР наблюдаются в темный период суток и начинаются в часы захода солнца в каждом пункте. Рисунок 1, б, г демонстрирует суточные вариации ϵ за весь период времени на ст. NL и CR. Как видно на этих рисунках, после захода солнца появляется характерная зависимость ϵ со сменой знака, связанная с влиянием нижнего ионосферного резонатора [Ермакова и др., 2007, 2012]. Надо отметить, что суб-ИАР является частью ИАР, поскольку расположен на высо-

тах, которые включает в себя ИАР, и связан с дополнительной областью отражения УНЧ-волн на высотах нижней границы F-слоя ионосферы. Отражение УНЧ-волн еще и от этой области неизбежно сказывается на спектрах регистрируемого на поверхности земли магнитного УНЧ-шума. Поскольку набег фазы нормальных волн при отражении от нижней границы F-слоя в разы меньше, чем при отражении от верхней границы F-слоя, суб-ИАР не влияет существенно на частотные масштабы резонансной структуры спектра (РСС). Суперпозиция двух резонаторов проявляется в спектрах фонового шума на земле в виде наложения крупномасштабной вариации на более мелкомасштабную РСС. Коэффициенты отражения от верхней и нижней границ F-слоя могут зависеть от разных гелиогеофизических условий. Например, на средних широтах вероятность появления РСС выше в годы минимума солнечной активности. В годы максимума солнечной активности и летний период коэффициент отражения от верхней границы F-слоя существенно уменьшается, что приводит к слабым осцилляциям РСС в малом диапазоне частот (до 2–4 Гц) или к отсутствию РСС на среднеширотных станциях [Потапов и др., 2021]. Зависимость коэффициента отражения от нижней границы F-слоя от уровня солнечной активности имеет другой характер, поэтому в годы, близкие к максимуму солнечной активности, и в летний период может наблюдаться только широкополосный спектральный максимум в спектрах ϵ и магнитных компонент. Спектры магнитных компонент, которые приведены в [Ермакова и др., 2007], демонстрируют наличие только ШСМ. Как правило, центральная частота ШСМ лежит ниже частоты первой моды ШР, однако влияние суб-ИАР на спектры поляризации может быть заметным и на частотах больше 7–8 Гц (область положительных значений ϵ). Поскольку верхние стенки у ИАР и суб-ИАР разные, то эти резонаторы могут проявляться как в одном и том же, так и в разных частотных диапазонах. На спектрограмме ϵ на ст. NL (рис. 1, а) РСС появляется практически в том же частотном диапазоне, что и широкополосная вариация, — до 14–16 Гц, кроме первых часов после захода солнца, когда РСС появляется в частотном диапазоне до 8 Гц, а широкополосная структура — до 12 Гц. На спектрограмме ϵ , построенной для ст. CR (рис. 1, в), нижний резонатор влияет на спектры ϵ в частотном диапазоне до 9–10 Гц, а влияние ИАР ограничено частотами 2–4 Гц, что связано с отсутствием нарушения геометрической оптики для нормальных волн во внешней ионосфере на частотах более 4 Гц. Проявление суб-ИАР в спектрах параметра поляризации в более широком частотном диапазоне подтверждает автономность его влияния на спектры УНЧ-шума на земле.

Для сравнения влияния суб-ИАР на разных станциях и в разные периоды суток были использованы понятия «оптическая толщина» и «добротность» резонатора. О добротности суб-ИАР можно судить по глубине крупномасштабной осцилляции в спектре ϵ относительно нулевых значений, т. е. по максимальным абсолютным значениям этого параметра. Оптическая толщина резонатора — это оптическая

плотность ионосферных слоев на его высотах, которая определяется набегом фазы нормальных волн в резонаторе. Характеристикой оптической толщины суб-ИАР может служить граничная частота $f_{гр}$, которая отделяет левую поляризацию от правой в спектре ϵ фонового шума и равна центральной частоте ШСМ [Ермакова и др., 2012]. На спектрограммах на рис. 1, *а, в* видно, что в начале темного периода суток влияние суб-ИАР увеличивает значения ϵ в полосе первого ШР на обеих станциях, уменьшая степень круговой поляризации магнитных полей, а в отдельные часы меняет характер поляризации с левой на правую (рис. 1, *б, з*).

В этот период значения $f_{гр}$ остаются меньше частоты первого ШР $f_{1ШР}$. После 20:00 UT на ст. NL происходит резкое уменьшение поляризационного параметра до $\epsilon \leq -0.4$ (рис. 1, *б*), что означает резкое увеличение степени круговой поляризации магнитного поля в полосе первого ШР. Таким образом, абсолютные значения ϵ становятся больше абсолютных значений в светлое время суток, а значения $f_{гр}$ — больше $f_{1ШР}$. Надо отметить, что на ст. NL ИАР также вносил вклад в увеличение абсолютной величины ϵ после 19:00 UT, когда минимумы в резонансной структуре параметра ϵ попадали в полосу первого ШР. На ст. CR наблюдалось увеличение значений ϵ в полосе первого ШР, а значения $f_{гр}$ в темный период времени оставались меньше частоты первой моды ШР.

Приведем теперь для сравнения спектрограммы поляризационного параметра на станциях разных широт. Для этого используем данные одновременной регистрации горизонтальных магнитных УНЧ-полей 23.10.2008 в обсерваториях MR, NL, LOZ, ВАВ.

Магнитное поле в полосе первого шумановского резонанса в Северном полушарии имеет преимущественно левую поляризацию [Ролдугин, Васильев, 2012; Колосков и др., 2005], и это подтверждают данные мониторинга во всех низкочастотных обсерваториях (рис. 2). Но абсолютные значения ϵ в полосе первого ШР на более низкоширотной станции существенно меньше, чем на более высокоширотных станциях. Как видно из рис. 2, состояние ионосферы над станциями сильно различалось: резонатор ИАР на ст. NL и LOZ имел более высокую добротность, чем на других станциях, что проявлялось в большом частотном диапазоне РСС до 16 Гц. На ст. NL (рис. 2, *б*) влияние суб-ИАР было наиболее заметно весь темный период времени. На ст. MR влияние суб-ИАР на поляризацию УНЧ-шума в полосе первого ШР сказалось после 21:00 UT, когда существенно выросла добротность этого резонатора (см. рис. 2, *а*). Верхняя частота диапазона, в котором регистрировалась широкополосная структура на этой станции (до 14–16 Гц), была так же, как и на ст. CR, существенно выше, чем верхняя частота диапазона, в котором регистрировалась РСС (4–5 Гц).

Таким образом, появление вариаций ϵ на частоте первого ШР на разных станциях в темное время суток коррелирует с появлением крупномасштабной знакопеременной частотной зависимости и РСС в спектрах этого параметра (рис. 2, *а–в*). Рисунок 3, на котором приведена суточная динамика ϵ на частоте первого ШР на всех станциях, демонстрирует

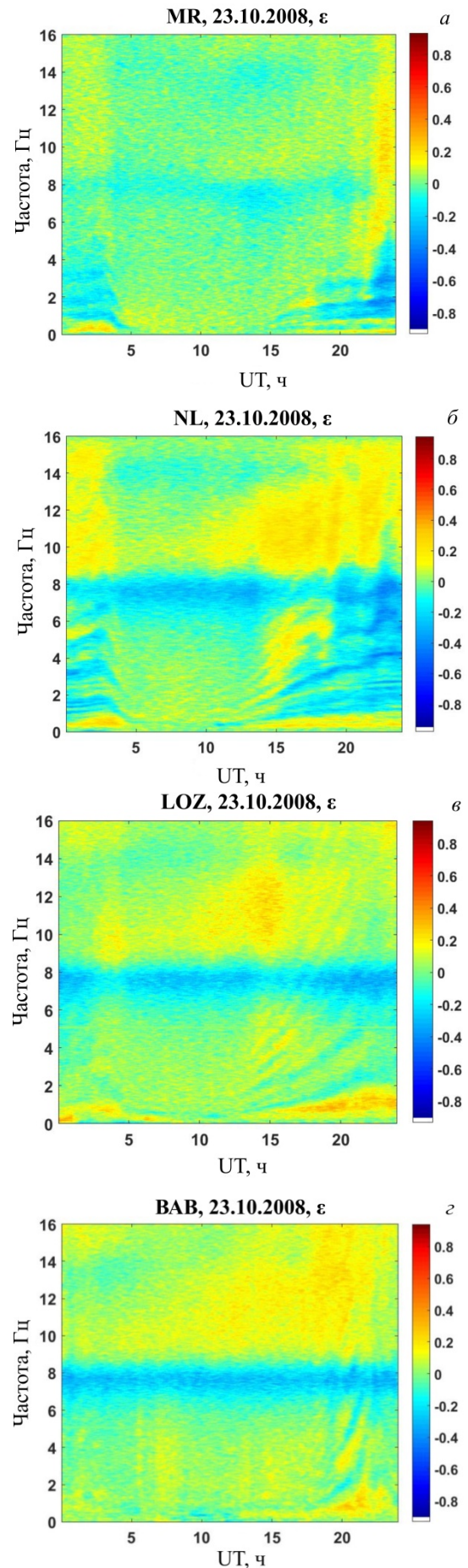


Рис. 2. Спектрограммы параметра ϵ на ст. MR (*а*), NL (*б*), LOZ (*в*), ВАВ (*г*) 23.10.2008

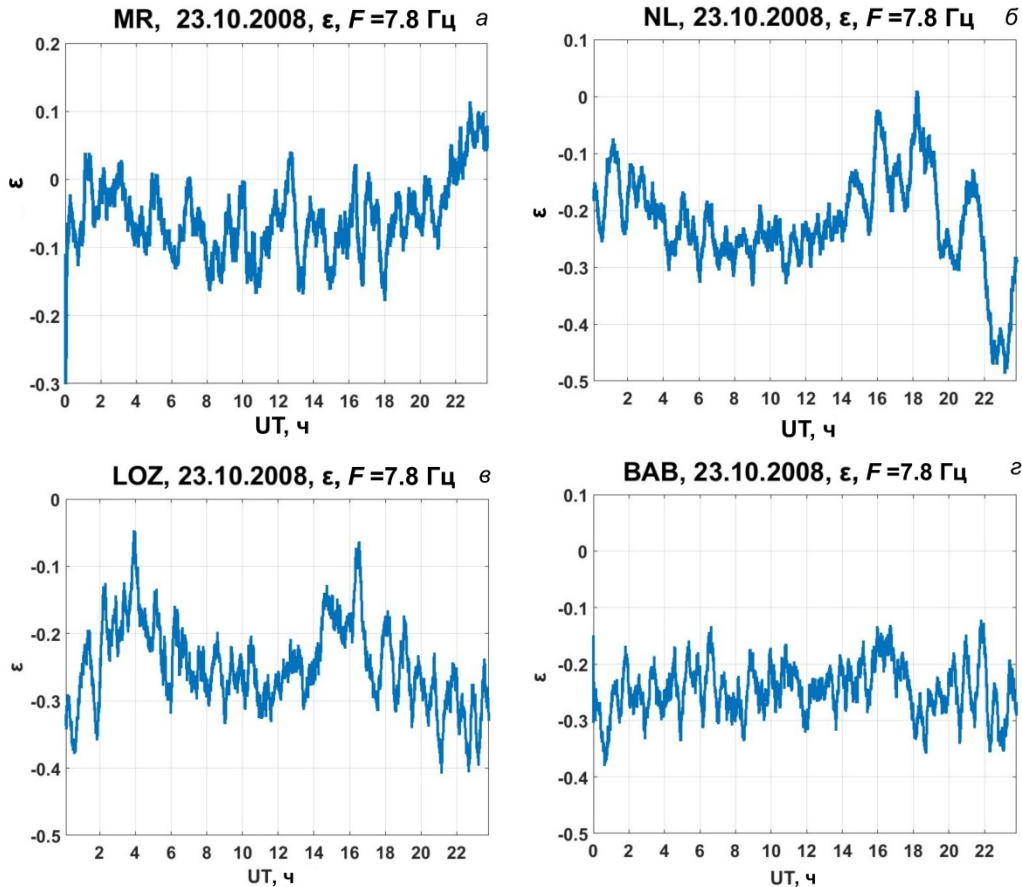


Рис. 3. Суточный ход параметра ϵ 23.10.2008 на ст. MR (а), NL (б), LOZ (в), VAB (г)

разный характер вариаций этого параметра во всех обсерваториях.

Наиболее сильные вариации параметра ϵ наблюдаются в частотной полосе первого ШР в темное время суток на ст. NL, что связано с влиянием обоих резонаторов. На более низкоширотной станции MR влияние суб-ИАР привело к изменению характера поляризации в полосе первого ШР (положительные значения ϵ после 22:00 UT). Наиболее слабые суточные вариации поляризации зафиксированы на самой высокоширотной станции VAB, что связано с малым влиянием ионосферных резонаторов над этой станцией на спектры ϵ в течение данных суток.

Были выполнены также исследования влияния ионосферных резонаторов на спектральную амплитуду УНЧ-шума в полосе первого ШР, при этом заметного влияния суб-ИАР выявлено не было. На рис. 4 приведены спектры магнитной компоненты СЮ на ст. NL и BOR, демонстрирующие влияние локальных ИАР. ИАР над среднеширотными станциями мог приводить к изменению частотной полосы ШР, к смещению его центральной частоты (рис. 4, а, б).

Анализ спектров магнитной компоненты СЮ и суточного хода спектральной амплитуды СЮ за 17.03.2008 на ст. NL позволяет сделать вывод, что из-за вариаций суточного масштаба РСС после 19:00 UT амплитуда магнитной компоненты СЮ на частоте первого ШР изменялась на 20–30 % (рис. 4, а, б, г). На рис. 4, в приведены спектры компоненты СЮ при одновременной регистрации на ст. NL и BOR,

разнесенных на расстояние порядка 400 км. Разница в частотных масштабах РСС привела к разному смещению максимума амплитуды в полосе первого ШР на этих станциях. Таким образом, влияние локальных ИАР может быть причиной разного характера амплитудных спектров в полосе первой моды даже на небольших расстояниях.

Для каждой станции была исследована также суточная динамика модуля азимутального угла ψ между главной осью эллипса поляризации вектора магнитного поля и направлением ВЗ 23.10.2008 (рис. 5). Этот параметр был выбран для анализа, чтобы уменьшить разброс в вариациях азимутального угла при изменении интенсивности экваториальных источников гроз. Как следует из рис. 5, на частоте первого ШР крупномасштабные вариации ψ в суточной динамике определяются в основном изменениями интенсивности глобальных грозовых очагов и имеют сходный характер на всех станциях. Различие наблюдается в значениях ψ : на низкоширотной и среднеширотной станциях значения ψ варьируют в пределах 40°–60°, на более высокоширотных станциях — в пределах 30°–55°. Это связано с тем, что для полярных обсерваторий угол между направлением на глобальные источники гроз и направлением ВЗ больше, чем для более южных станций. Минимальные значения азимутального угла (30°–40°) на станциях соответствуют преобладающему влиянию Африканского источника гроз, максимальные значения (55°–60°) — влиянию Американского и Азиатского источников гроз.

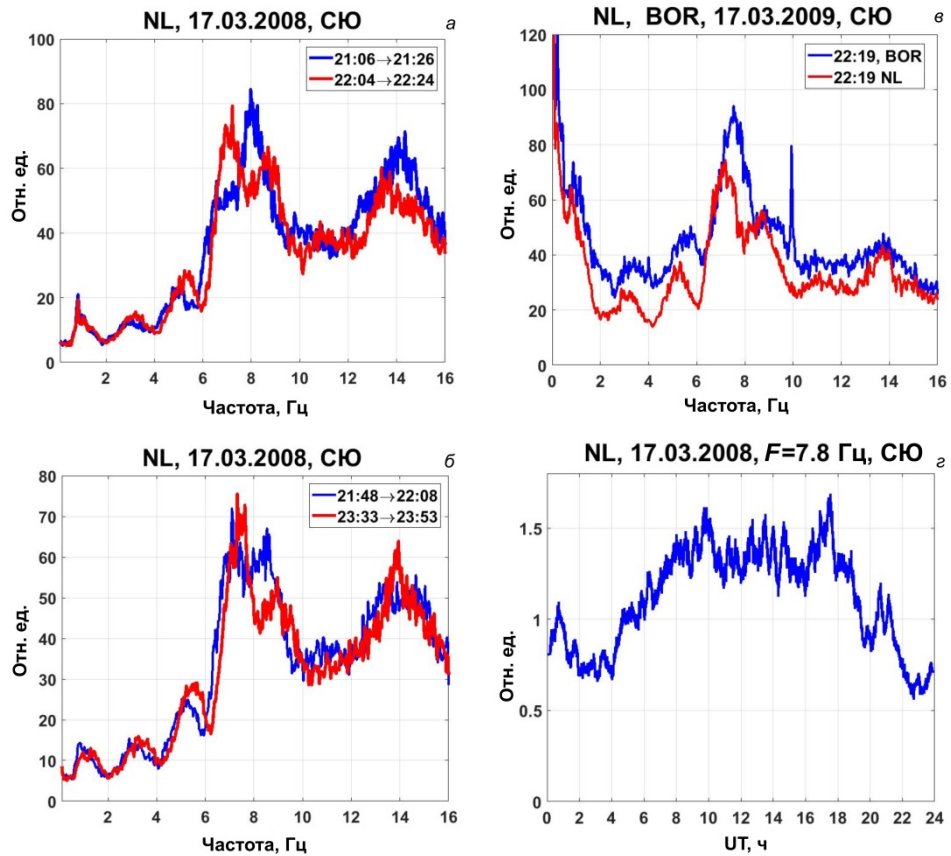


Рис. 4. Спектры компоненты СЮ 17.03.2008 на ст. NL (а, б) и 17.03.2009 на ст. NL и BOR (в), а также суточный ход спектральной амплитуды СЮ на частоте 7.8 Гц 17.03.2008 на ст. NL (г)

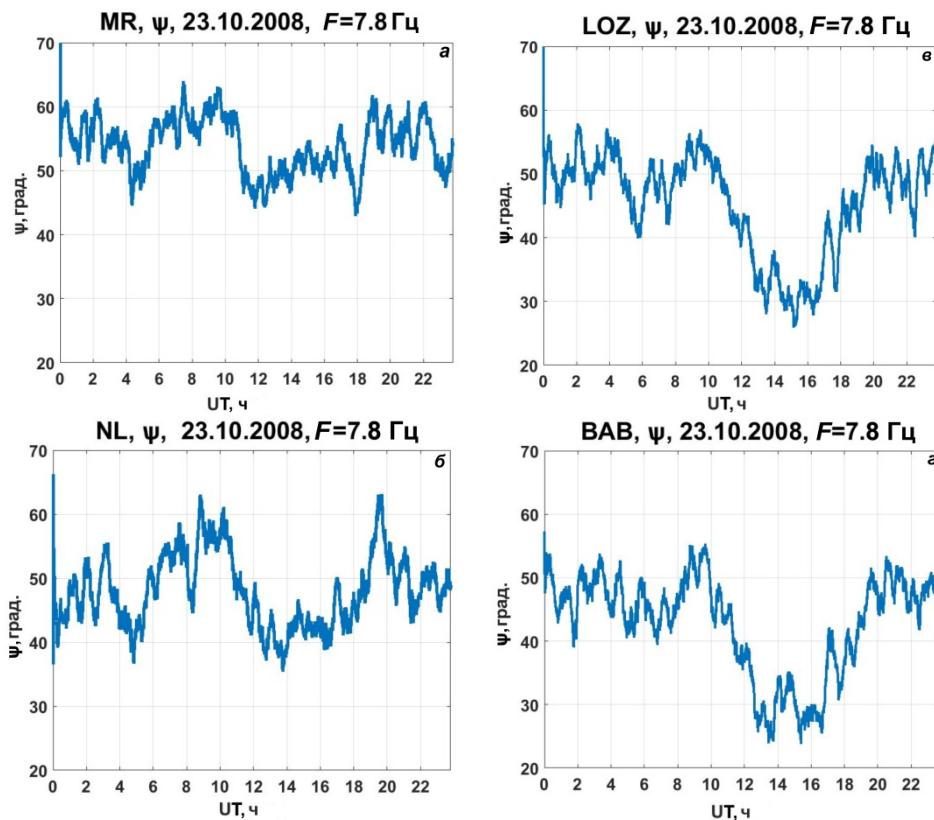


Рис. 5. Суточный ход модуля азимутального угла на ст. MR (а), NL (б), LOZ (в), BAB (г) 23.10.2008

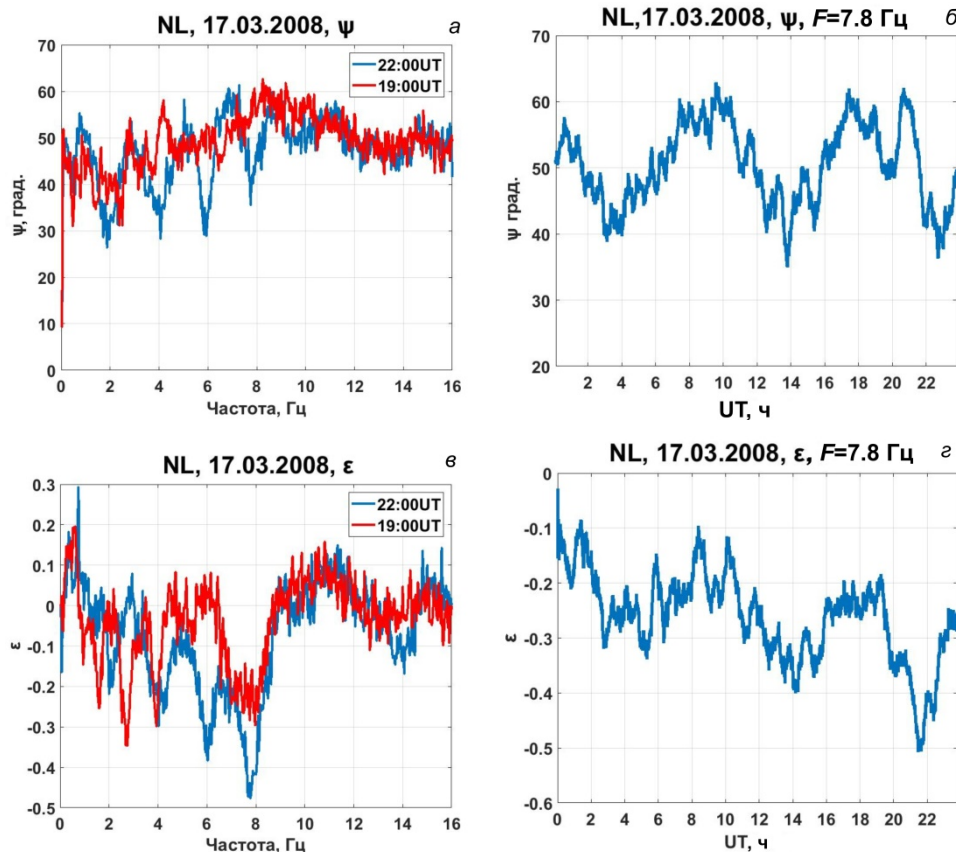


Рис. 6. Спектры (а, в) и суточный ход (б, г) параметров ψ и ϵ 17.03.2008 на ст. NL

Сравним теперь влияние ИАР в полосе первого ШР на азимутальный угол и поляризационный параметр. Для анализа был выбран день, когда добротность нижнего ионосферного резонатора была невысока, — 17.03.2008.

Как видно из рис. 6, в, г, из-за низкой добротности нижнего резонатора после захода солнца наблюдалось слабое увеличение (соответственно, уменьшение абсолютной величины) параметра ϵ : $\epsilon \approx -0.2$, что незначительно превышало дневные значения, в отличие от события 23.10.2008 (см. рис. 3, б), когда параметр ϵ достигал нулевых значений в полосе первого ШР. После 19:00 UT наблюдалось резкое увеличение степени круговой поляризации в области отрицательных значений ϵ из-за того, что минимум РСС в спектре ϵ попал на частоту первой моды ШР. Как видно из рис. 6, влияние ИАР в полосе первого ШР привело к вариациям угла ψ на 15° – 20° и к существенному, в 2–2.2 раза, уменьшению ϵ .

2. ОБСУЖДЕНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ РАСЧЕТЫ

Разный характер формирования спектров ϵ , амплитуды магнитных компонент и азимутального угла приводит к разному проявлению локальных резонаторов в спектрах этих параметров магнитного УНЧ-шума, в том числе в полосе первого ШР. Спектры поляризационного параметра не зависят от направления на источник, а спектры магнитных компонент и параметра ψ зависят от положения источника. Так, влияние суб-ИАР, приводящего к появлению широкопо-

лосного максимума, наиболее заметно в поведении продольной (вдоль направления на источник) компоненты поля [Ермакова и др., 2007]. При наличии одновременно разных грозовых источников влияние суб-ИАР на амплитуды магнитных компонент может существенно уменьшиться. На рис. 7 приведены спектры магнитной компоненты и параметра ϵ за два периода суток 08.09.2011. Практически полное исчезновение ШСМ в спектре магнитной компоненты не сопровождалось исчезновением характерной для влияния суб-ИАР зависимости спектра ϵ с переменной знака. Таким образом, влияние суб-ИАР наиболее отчетливо проявляется в динамике параметра ϵ . Величина азимутального угла и характер его спектра также зависят от направления на источник [Ермакова и др., 2014], и при сложении полей от различных источников вариации этого параметра из-за влияния суб-ИАР могут быть существенно меньше, чем вариации ϵ .

Таким образом, в полосе первого ШР влияние обоих резонаторов наиболее сильно проявляется в спектрах ϵ .

Для анализа спектров поляризационных параметров на частоте первого ШР на разноширотных станциях выполним численные расчеты этих параметров. Мы будем использовать результаты решения задачи о вычислении магнитных компонент от вертикального электрического диполя в сферическом горизонтально-неоднородном волноводе земля—ионосфера [Кириллов, Копейкин, 2002] и пользоваться методикой расчета поверхностного импеданса анизотропной неоднородной ионосферы, разви-

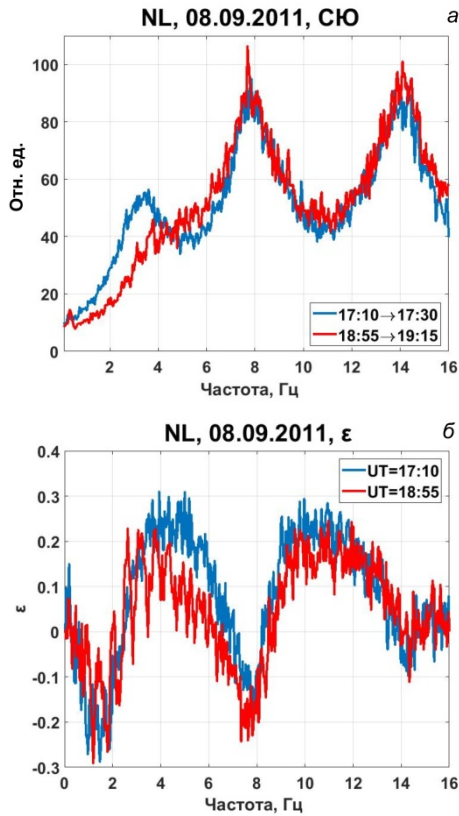


Рис. 7. Спектры магнитной компоненты СЮ (а) и поляризационного параметра ϵ (б) на ст. NL 08.09.2011

той в [Ермакова и др., 2007, 2012]. Продольная и поперечная компоненты магнитного поля вычисляются по следующим формулам:

$$\begin{aligned}
 H_{\varphi} &= \frac{I\sqrt{D_s}}{4\pi ah(1)} \times \\
 &\times \left(nL_L^{-1}(2)^{\theta\theta} + \frac{h_{Sm,\theta\varphi}}{h_{Sm,\theta\theta}} hL_L^{-1}(2)^{\theta\varphi} \right) \operatorname{ctg}\left(\frac{r}{2a}\right), \\
 H_{\theta} &= -\frac{I\sqrt{D_s}}{4\pi ah(1)} \times \\
 &\times \left(hL_L^{-1}(2)^{\theta\theta} + \frac{h_{Sm,\theta\varphi}}{h_{Sm,\theta\theta}} hL_L^{-1}(2)^{\theta\varphi} \right) \operatorname{ctg}\left(\frac{r}{2a}\right).
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Здесь I — токовый момент источника; a — радиус Земли; r — расстояние от источника до приемника по геодезической линии; D_s — детерминант матрицы \hat{h}_{Sm} , $h(1)$ — высота нижней границы ионосферы в точке источника; цифра (2) означает, что компоненты матрицы hL_L^{-1} определяются в точке приемного пункта, формулы для вычисления матриц \hat{hL}_L^{-1} и \hat{h}_{Sm} приведены в [Кириллов, Копейкин, 2003]. Использование решения для сферического волновода, полученного в этой работе, позволяет учитывать горизонтальную неоднородность ионосферы вдоль трассы распространения УНЧ-волн. Однако, как было показано в работе [Ермакова и др., 2011], характер спектров магнитных шумов мало зависит от неоднородности ионосферных параметров вдоль

трассы распространения низкочастотных волн и определяется в основном компонентами матрицы импеданса в точке регистрации магнитных полей. Таким образом, расчеты подтверждают выводы, сделанные в статьях [Поляков, Рапопорт, 1981; Беляев и др., 1987, 1989] по экспериментальным данным, о том, что механизм формирования РСС имеет локальный характер.

Надо отметить, что модельные спектры не учитывают особенностей формирования шумановского резонанса, но адекватно описывают характер экспериментальных спектров ϵ ниже и выше этого частотного диапазона и могут объяснить характер суточных вариаций ϵ в полосе первого ШР, обусловленных влиянием суб-ИАР и ИАР.

На рис. 8 приведены модельные спектры поляризационного параметра ϵ и азимутального угла ψ между большой осью эллипса поляризации магнитного поля и направлением ВЗ для разных состояний ионосферной плазмы в темное время суток. Эти спектры показывают, что влияние локальной ионосферы, в данном случае суб-ИАР, может быть существенным для единичного источника на частотах первого ШР. Как видно из рис. 8, а, в зависимости от оптической толщины и добротности резонатора вклад суб-ИАР в поляризацию магнитного поля в полосе первого ШР может приводить как к увеличению, так и к уменьшению модуля ϵ (синяя и красная кривые соответственно). Влияние суб-ИАР может приводить также к отклонению ориентации магнитного поля в полосе первого ШР от направления ТН-поляризации на 10° – 20° (см. рис. 8, б).

Однако в экспериментальных спектрах угла ψ в частотной полосе первого ШР не было обнаружено влияния суб-ИАР. Возможно, это связано с причинами, которые анализировались выше, а именно с наличием нескольких грозových очагов.

Обсудим причины разного характера изменений поляризации в полосе первого шумановского резонанса на разных станциях 23.10.2008. Проанализируем суточный ход ϵ на ст. LOZ и NL. Рисунок 3, б, демонстрирует сходный характер вариаций ϵ на частоте первого ШР в темное время суток на этих станциях. Однако из-за малой добротности суб-ИАР на ст. LOZ после захода солнца изменение ϵ в полосе первого ШР было не таким значительным, как на ст. NL: максимальные значения ϵ увеличивались до $-0.02 \div 0.1$ на ст. NL и до $-1.3 \div -0.8$ на ст. LOZ. На рис. 9 приведены спектры поляризационного параметра на этих станциях в первую половину темного периода суток. Спектры ϵ подтверждают, что глубина осцилляций как крупномасштабной вариации, так и мелкомасштабной РСС была значительно больше на ст. NL. Одновременное влияние ИАР и суб-ИАР привело к резкому увеличению значений ϵ , когда максимум РСС попал на центральную частоту первой моды ШР на ст. NL (рис. 9, б). Уменьшение значений ϵ в полосе первой моды ШР во второй половине темного периода суток связано с разными факторами: на ст. NL — с влиянием ИАР и суб-ИАР с большими значениями f_{ip} (рис. 10, б), а на ст. LOZ — с исчезновением влияния ИАР и суб-ИАР

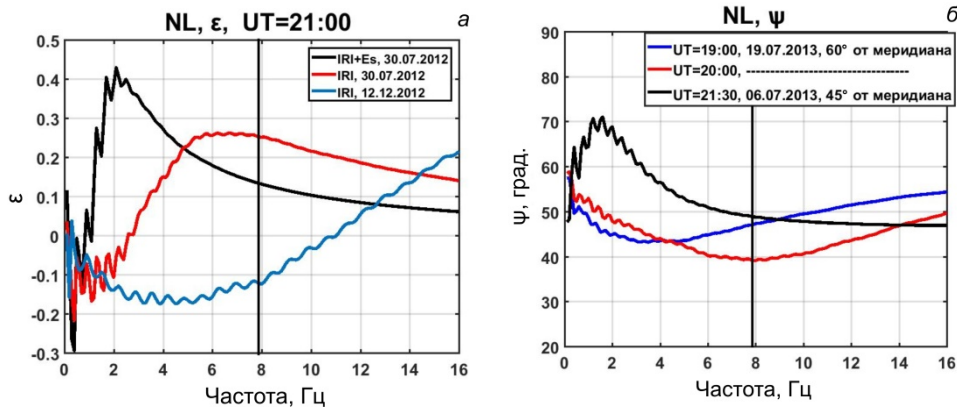


Рис. 8. Модельные спектры параметра ϵ (а) и азимутального угла ψ для различных направлений на источник (б) для ст. NL

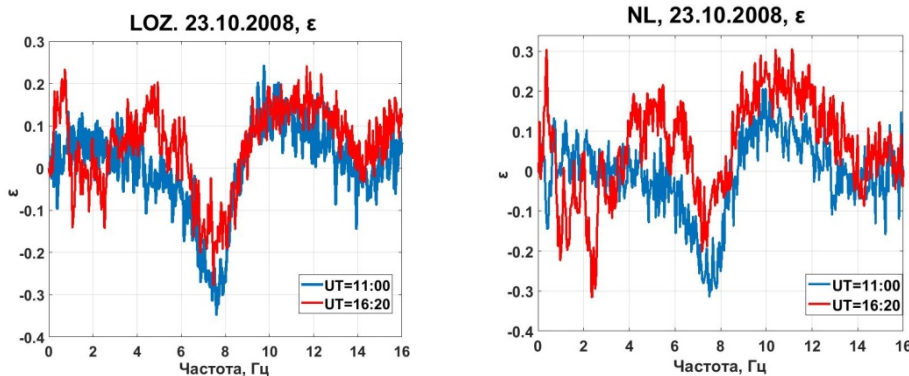


Рис. 9. Экспериментальные спектры параметра ϵ на ст. LOZ (а) и NL (б) 23.10.2008

(см. рис. 2, в). Это привело к возвращению параметра ϵ к почти дневным значениям на ст. LOZ (см. рис. 3, в).

На рис. 10 (левые панели) приведены спектры поляризационного параметра для разных отрезков времени 23.10.2008 для ст. MR, NL и ВАВ. Как уже было сказано, разная суточная динамика ϵ (см. рис. 3, а, б, в) на этих станциях связана как с меньшими абсолютными значениями параметра ϵ на частоте первого ШР на ст. MR (в том числе в дневное время), так и с разным состоянием ионосферной плазмы над станциями. Последнее, в свою очередь, привело к разным параметрам ионосферных резонаторов над обсерваториями, что демонстрируют экспериментальные спектры ϵ . На ст. MR из-за увеличения добротности и большой оптической плотности суб-ИАР после 21:00 UT ($f_{гр} < f_{IШР}$), а также малых значений ϵ в полосе первого ШР произошло изменение поляризации после 21:00 UT с левой на правую (рис. 10, а). Самые значительные вариации параметров суб-ИАР наблюдались на ст. NL: в темный период времени значительно менялась оптическая плотность резонатора, $f_{гр}$ увеличилась примерно в три раза и стала больше частоты первого ШР. Одновременное влияние двух резонаторов привело к резкому изменению ϵ на частотах первого ШР после 20:00 UT (рис. 10, б). В отличие от случая, рассмотренного на рис. 9, б, здесь на центральную частоту первой моды ШР попали минимумы РСС. Экспериментальные спектры ϵ , построенные для ст. ВАВ (рис. 10, в), подтверждают, что существенных изменений в ве-

личине и характере частотной зависимости ϵ на частотах ниже и в полосе первого шумановского резонанса на этой станции в течение суток зарегистрировано не было. Это означает, что влияние суб-ИАР и ИАР из-за их низкой добротности было незначительным.

На правых панелях рис. 10 приведены модельные спектры параметра ϵ , построенные для разных станций по модели IRI-2016. Для ст. ВАВ дополнительно использовались ионосферные данные, полученные с помощью радара некогерентного рассеяния на Шпицбергене. На этих графиках нас интересовали вариации ϵ в полосе первого ШР в темный период суток. Модельные спектры, построенные для ст. MR, подтвердили небольшие значения $f_{гр}$ (~2–4 Гц) и увеличение ϵ на частотах первого ШР в 23:00 UT (рис. 10, в). Такие изменения параметров суб-ИАР привели к смене поляризации первого ШР с левой на правую на ст. MR после 21:00 UT (см. рис. 3, а). На ст. NL происходило резкое изменение параметров суб-ИАР в темный период, что привело к кратному увеличению $f_{гр}$ и смене знака ϵ в частотной полосе первого ШР (рис. 10, д). Поэтому вклад локальной ионосферы уменьшил абсолютные значения ϵ на частоте первого ШР сразу после захода солнца и увеличил абсолютные значения ϵ в полосе первого ШР с левой поляризацией после 19:00 UT (см. рис. 3, б). Для ст. ВАВ в модельных спектрах ϵ отсутствуют существенные изменения поляризации на частоте первого ШР в исследуемый период (рис. 10, е),

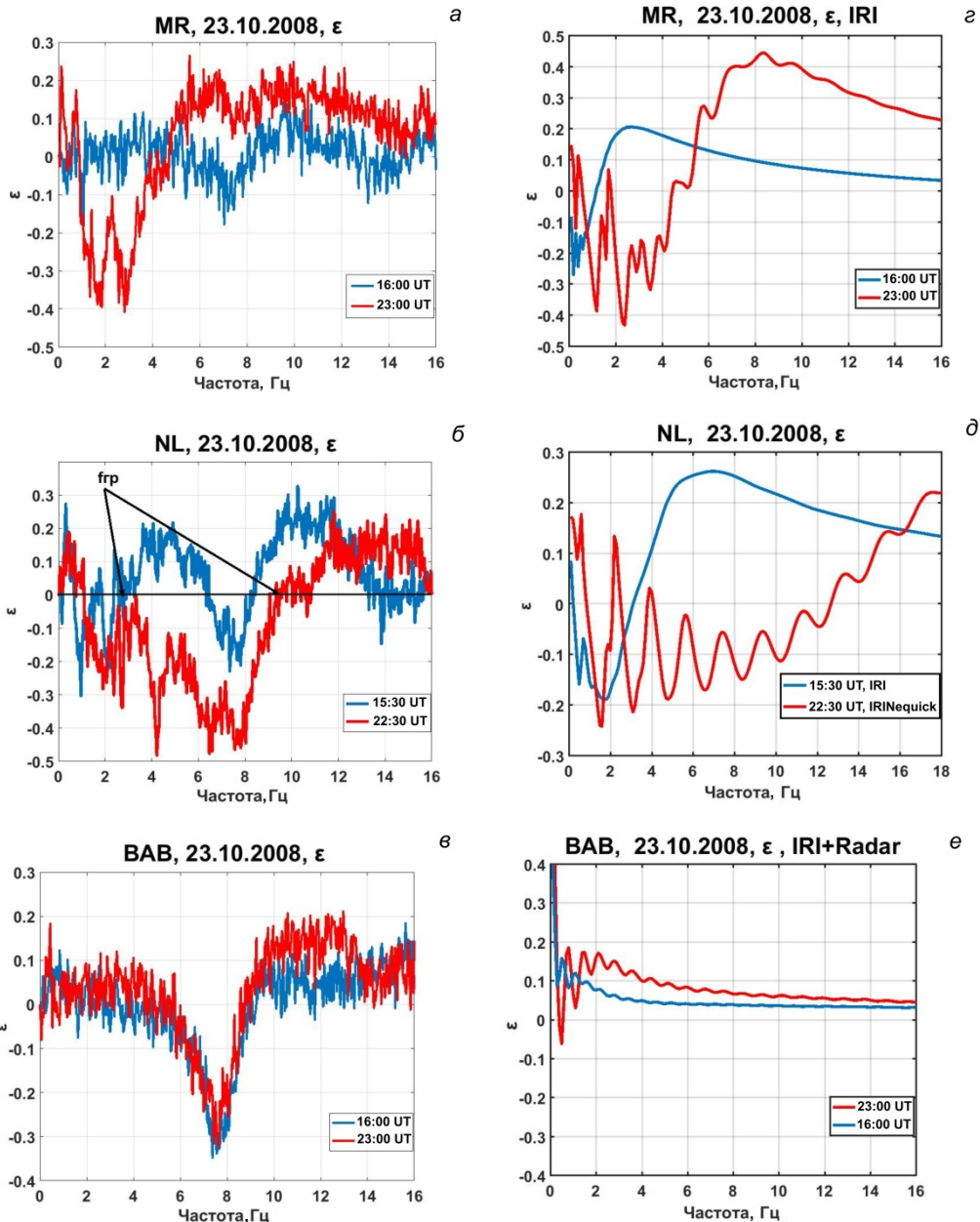


Рис. 10. Экспериментальные спектры параметра ϵ на станциях MR, NL, BAB за 23.10.2008 (левые панели), модельные спектры ϵ для тех же станций (правые панели)

что связано с малым влиянием локальных резонаторов на спектры этого параметра в соответствующей частотной полосе.

Таким образом, расчетные спектры ϵ показывают, что локальная ионосфера над обсерваториями может вносить существенный вклад в динамику ϵ на частотах первой моды ШР в темное время суток.

ВЫВОДЫ

На основе сравнения спектров и суточной динамики амплитуды и поляризации магнитного УНЧ-шума в частотной полосе первого шумановского резонанса на станциях, разнесенных на большие (>1500 км) и малые расстояния (~400 км), обнаружено влияние локальной неоднородной ионосферы на амплитуду и поляризацию первого ШР.

Показано, что наиболее отчетливо это влияние проявляется в спектрах поляризационного параметра в темное время суток, причем характер вариаций существенно зависит от параметров суб-ИАР. В случае неравенства $f_{гр} < f_{1ШР}$ степень эллиптичности под влиянием локальной ионосферы уменьшается, также в этом случае может меняться характер поляризации с левой на правую; в случае $f_{гр} > f_{1ШР}$ степень эллиптичности может увеличиваться, при этом поляризация остается левой.

Высокочастотный ИАР может также менять степень эллиптичности первого ШР, при этом характер изменений зависит от частотного масштаба резонансных осцилляций, связанных с ИАР.

Влияние резонаторов ИАР и суб-ИАР на азимутальный угол вектора магнитного поля в частотной

полосе первого ШР менее заметно и может приводить к вариациям этого параметра на 10° – 20° .

Показано, что влияние высокочастотного ИАР может приводить к изменению формы амплитудного спектра в полосе первой моды ШР: сужению или уширению частотной полосы ШР и к смещению его центральной частоты.

Анализ данных разнесенной регистрации с базами 400 км подтвердил влияние локальных ИАР на амплитуду магнитного шума в полосе первого ШР при горизонтальной неоднородности ионосферы.

Модельные спектры параметра ϵ , полученные на основе расчетов магнитного поля в сферическом волноводе земля–ионосфера от источника типа вертикального электрического диполя, подтвердили вклад локального суб-ИАР в формирование поляризации магнитного поля в полосе первого ШР в темное время суток.

Авторы благодарны: проф. Университета Тель-Авива Колину Г. Прайсу за предоставленные данные низкочастотного пункта в Мицпе-Рамоне; доктору Университета Оулу, Финляндия, Безингеру Т. за предоставленные данные с о-ва Крит; Полярному геофизическому институту, Апатиты, за предоставленные низкочастотные данные обсерваторий «Ловозеро» и «Баренцбург».

Работа выполнена по проекту № FSWR-2023-0038 в рамках базовой части Государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Беляев П.П., Поляков С.В., Рапопорт В.О., Трахтенгерц В.Ю. Обнаружение резонансной структуры спектра атмосферного электромагнитного шумового фона в диапазоне короткопериодных геомагнитных пульсаций. *Докл. АН СССР*. 1987. Т. 297. С. 840–843.

Беляев П.П., Поляков С.В., Рапопорт В.О., Трахтенгерц В.Ю. Экспериментальные исследования резонансной структуры атмосферного электромагнитного шумового фона в диапазоне короткопериодных геомагнитных пульсаций. *Изв. вузов. Радиофизика*. 1989. Т. 32, № 6. С. 663–671.

Ермакова Е.Н., Котик Д.С., Поляков С.В., Щенников А.В. О механизме формирования широкополосного максимума в спектре фонового шума на частотах 2–6 Гц. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2007. Т. 50, № 7. С. 607–623.

Ермакова Е.Н., Поляков С.В., Семёнова Н.В. Исследование резонансных структур с разными частотными масштабами в спектре фонового КНЧ-шума на средних широтах. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2011. Т. 54, № 12. С. 881–890.

Ермакова Е.Н., Котик Д.С., Рябов А.В. и др. Исследование вариаций параметров широкополосного спектрального максимума в естественных шумовых полях крайне низкочастотного диапазона. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2012. Т. 55, № 10–11. С. 671–682.

Ермакова Е.Н., Котик Д.С., Рябов А.В., Панютин А.А. Исследование влияния локальных грозových очагов на спектры параметров фонового УНЧ магнитного шума. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2014. Т. 57. Вып. 11. С. 875–888.

Кириллов В.В., Копейкин В.Н. Решение двухмерного телеграфного уравнения с анизотропными параметрами. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2002. Т. 45, № 12. С. 1011–1023.

Кириллов В.В., Копейкин В.Н. Формирование резонансной структуры локальной индуктивности. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2003. Т. 46, № 1. С. 1–12.

Колосков А.В., Безродный В.Г., Буданов О.В. и др. Поляризационный мониторинг шумановских резонансов

в Антарктиде и восстановление характеристик мировой грозовой активности. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2005. Т. 10, № 1. С. 11–29.

Поляков С.В., Рапопорт В.О. Ионосферный альфвенский резонатор. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 1981. Т. 21, № 6. С. 816–822.

Потапов А.С., Полюшкина Т.Н., Цэгмэд Б. Морфология и диагностический потенциал ионосферного альфвенского резонатора. *Солнечно-земная физика*. 2021. Т. 7, № 3. С. 39–56. DOI: [10.12737/szf-73202104](https://doi.org/10.12737/szf-73202104).

Ролдугин В.К., Васильев А.Н. Вариации параметров эллипса поляризации шумановского резонанса в горизонтальной и вертикальной плоскостях по наблюдениям в обсерваториях Баренцбург и Ловозеро. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2012. Т. 52, № 1, С. 73–81.

Русаков Н.Н., Бакастов С.С. Вращение горизонтальной проекции вектора возмущения магнитного поля на частотах шумановского резонанса. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 1988. Т. 28, № 6. С. 919–922.

Bosinger T., Demekhov A.G., Ermakova E.N., et al. Pulsating nighttime magnetic background noise in the upper ULF band at low latitudes. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2014. Vol. 119, no. 5. P. 4109–4119. DOI: [10.1002/2014ja019906](https://doi.org/10.1002/2014ja019906).

Bösinger T., Shalimov S.L. Dispersive changes in magnetic background noise polarization at 0.1 to 6 Hz during sunset and sunrise at $L=1.3$. *Ann. Geophys.* 2004. Vol. 22, no. 6. P. 1–12. DOI: [10.5194/angeo-22-1989-2004](https://doi.org/10.5194/angeo-22-1989-2004).

Greenberg E., Price C. Diurnal variations of ELF transients and background noise in the Schumann resonance band. *Radio Sci.* 2007. Vol. 42, no. 2. RS2S08. P. 1–14. DOI: [10.1029/2006RS003477](https://doi.org/10.1029/2006RS003477).

Nickolaenko A.P., Rabinowicz L.M. Study of the annual changes of global lightning distribution and frequency variations of the first Schumann resonance mode. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 1995. Vol. 57, no. 11. P. 1345–1348. DOI: [10.1016/0021-9169\(94\)00114-4](https://doi.org/10.1016/0021-9169(94)00114-4).

Nickolaenko A.P., Satori G., Zieger B., et al. Parameters of global thunderstorm activity deduced from long-term Schumann resonance records. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 1998. Vol. 60, no. 3. P. 387–399. DOI: [10.1016/S1364-6826\(97\)00121-1](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(97)00121-1).

Ogawa T., Tanaka Y., Yasuhara M. Schumann resonances and world-wide thunderstorm activity—diurnal variations of the resonant power of natural noises in the earth-ionosphere cavity. *J. Geophys. Res.* 1969. Vol. 21, no. 1. P. 447–452.

Price C., Melnikov A. Diurnal, seasonal and inter-annual variations in the Schumann resonance parameters. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2004. Vol. 66, no. 13-14. P. 1179–1185. DOI: [10.1016/j.jastp.2004.05.004](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2004.05.004).

Roldugin V.C., Maltsev Y.P., Vasiljev A.N., et al. Diurnal variations of Schumann resonance frequency in NS and EW magnetic components. *J. Geophys. Res.* 2004. Vol. 109. A08304. P. 1–4. DOI: [10.1029/2004JA010487](https://doi.org/10.1029/2004JA010487).

Satori G., Zieger B. Spectral characteristics of Schumann resonances observed in Central Europe. *J. Geophys. Res.* 1996. Vol. 101, no. D23. P. 29663–29669. DOI: [10.1029/96JD00549](https://doi.org/10.1029/96JD00549).

Schlegel K., Fullekrug M. Diurnal harmonics in Schumann resonance parameters observed on both hemispheres. *Geophys. Res. Lett.* 2000. Vol. 27, no. 17. P. 2805–2808. DOI: [10.1029/2000GL003774](https://doi.org/10.1029/2000GL003774).

Sentman D.D. Magnetic elliptical polarization of Schumann resonances. *Radio Sci.* 1987. Vol. 22, no. 4. P. 595–606. DOI: [10.1029/RS022i004p00595](https://doi.org/10.1029/RS022i004p00595).

Как цитировать эту статью:

Ермакова Е.Н., Рябов А.В. Влияние ионосферных резонансов на суточную динамику спектральных параметров первого шумановского резонанса по данным меридиональной сети УНЧ-магнитометров. *Солнечно-земная физика*. 2024. Т. 10, № 2. С. 67–78. DOI: [10.12737/szf-102202407](https://doi.org/10.12737/szf-102202407).