

УДК: 550.383

DOI: 10.26907/rwp29.2025.344-347

ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРОВ УНЧ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ОТ НАЗЕМНЫХ ИСТОЧНИКОВ РАЗНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Е.Н. Ермакова, А.В. Рябов

НИРФИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Б. Печерская, 25/12а

E-mail: l.ermakova@nirfi.unn.ru

Аннотация. В работе выполнен сравнительный анализ амплитудных и поляризационных спектров УНЧ магнитных полей для источников типа горизонтальный магнитный и вертикальный электрический диполи. На основе численных расчетов для разной степени горизонтальной неоднородности волновода земля-ионосфера проанализированы особенности формирования амплитудных и поляризационных спектров УНЧ магнитного поля от разных источников. Рассмотрены случаи высокодобротных ИАР и суб-ИАР. Разное влияние ионосферных резонаторов на амплитуду магнитного поля от разных источников продемонстрировано на примере суточной динамики величины сигнал/шум для магнитных компонент искусственного УНЧ сигнала в экспериментах с Кольским излучателем 2001, 2024 г. г.

Ключевые слова: магнитный шум; грозовые источники; горизонтальные токовые линии; поляризация; ионосферные резонаторы; спектральные параметры

FEATURES OF SPECTRA OF ULF MAGNETIC FIELDS FROM GROUND SOURCES OF DIFFERENT ORIGIN

Е.Н. Ермакова, А.В. Рябов

Abstract. The paper presents a comparative analysis of the spectral parameters of ULF magnetic fields for sources of the horizontal magnetic and vertical electric dipole types. Based on numerical calculations for different degrees of horizontal inhomogeneity of the earth-ionosphere waveguide, the features of the amplitude and polarization spectra formation of the ULF magnetic field from different sources are analyzed. Cases of high-quality IAR and sub-IAR are considered. Different effects of ionospheric resonators on the amplitude of the magnetic field from different sources are demonstrated using the example of daily dynamics of the signal-to-noise ratio for magnetic components of artificial ULF signal in experiments with the Kola emitter 2001, 2024.

Keywords: magnetic noise; lightning sources; horizontal current lines; polarization; ionospheric resonators; spectral parameters

Введение

В работе выполнен сравнительный анализ амплитудных и поляризационных спектров УНЧ магнитных полей для источников типа горизонтальный магнитный и вертикальный электрический диполи. Первым типом диполя могут быть аппроксимированы горизонтальные токовые линии. Такими источниками могут быть заземленные линии электропередач (ЛЭП) с масштабами порядка сотен километров, а также ионосферный источник, возникающий в нижних слоях ионосферы при воздействии на нее мощным радиоизлучением. Возможность регистрации искусственных КНЧ сигналов от ЛЭП на расстояниях порядка 1000-1400 км была подтверждена многочисленными экспериментами. И практически во всех экспериментах, даже при регистрации на более близких к источнику расстояниях, отмечалось влияние ионосферы на спектры компонент магнитного поля искусственного сигнала. В настоящей работе для анализа спектров УНЧ искусственных сигналов мы будем пользоваться результатами работ [1] и методикой расчета поверхностного импеданса неоднородной ионосферы, развитой в работе [2]. Предполагается, что ток ЛЭП и замыкающий его ток в земной коре на глубине образуют точечный магнитный диполь. При приеме искусственных УНЧ сигналов помехой, кроме антропогенных шумов, являются низкочастотные шумовые поля от глобальных грозовых очагов. Спектральные особенности УНЧ фоновых полей хорошо описываются моделью распространения волн данного диапазона в волноводе земля-ионосфера от источника типа вертикальный электрический диполь [1,3]. Ионосферные резонаторы ИАР (ионосферный альвеновский резонатор) и суб-ИАР (нижний ионосферный альвеновский резонатор) влияют на амплитуду и поляризацию УНЧ полей от обоих видов источников [2,3], но могут приводить к разной величине резонансных частот в их спектрах. Для демонстрации разного влияния ионосферных резонаторов на амплитуду УНЧ магнитных полей от разных источников

анализировалась динамики величины сигнал/шум в период экспериментов с Кольским излучателем 2001 г. и 2024 г. при разных состояниях ионосферной плазмы.

Цель работы

Целью работы является сравнительный анализ спектральных параметров УНЧ магнитных полей от горизонтальных токовых линий и грозовых источников при наличии высокодобротных ионосферных резонаторов и горизонтальной, вдоль трассы распространения УНЧ волн, неоднородности ионосферы.

Решаемые задачи, направленные на достижение цели.

Численные расчеты высотного профиля критерия геометрической оптики (КГО) для определения периодов и характера влияния ионосферных резонаторов на спектры низкочастотных полей от разных источников. Численные расчеты амплитудных и поляризационных спектров УНЧ магнитных полей разного происхождения для неоднородного волновода земля – ионосфера. Определение условий распространения и состояния ионосферы, при которых происходит сдвиг резонансных частот резонаторов в спектрах полей от разных источников. Исследование динамики отношения сигнал/шум на основе анализа экспериментов с Кольским излучателем 2001 и 2024 г. г.

Расчеты КГО, модельные и экспериментальные спектры УНЧ магнитных полей

Чтобы выяснить возможность влияния ионосферных резонаторов на амплитуду и поляризацию низкочастотных магнитных полей разного происхождения при разном состоянии ионосферной плазмы, были построены высотные профили параметра критерия геометрической оптики (КГО) для нормальной УНЧ волны в ионосфере для частот 2-8 Гц. Коэффициент КГО определяется следующей формулой:

$$KGO = \frac{n}{2} \frac{dn}{dz} \frac{\lambda}{2\pi} \quad (1)$$

Условие $KGO << 1$ является критерием выполнения геометрико-оптического (ГО) приближения, условие $KGO \geq 1$ соответствует нарушению ГО, n – показатель преломления нормальной волны, λ – длина волны в среде. Профили КГО построены для периодов с разной солнечной активностью для станции Новая Жизнь (NL, 56 с. ш., 46 в. д.) и приведены на рис. 1 (верхняя панель).

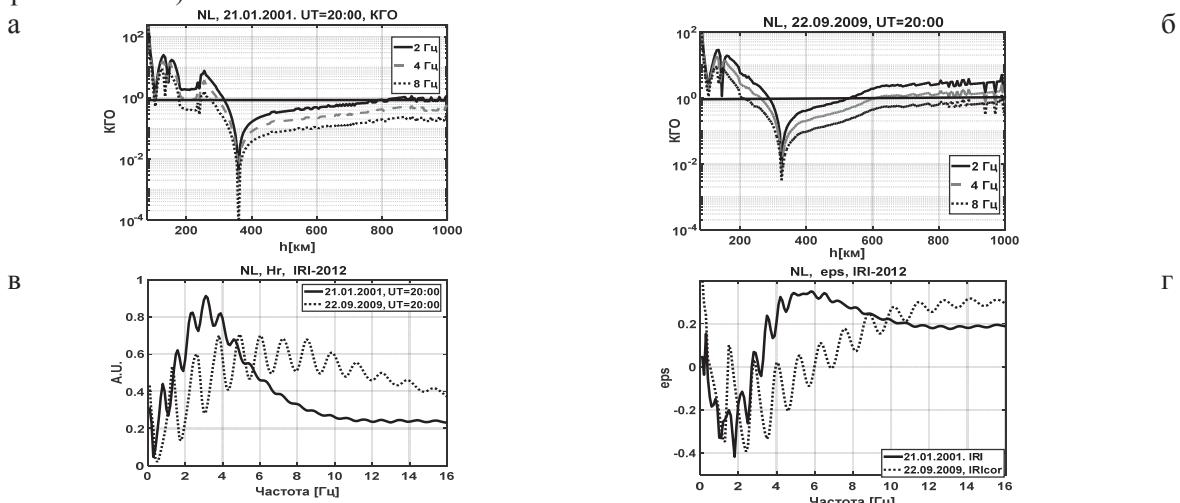


Рис. 1. Высотные профили КГО (а, б), спектры амплитуды и ε для разных состояний ионосферной плазмы (в, г).

Область нарушения ГО на нижнем основании F-слоя в период максимума солнечной активности имеет локальный характер (рис.1а), что приводит к сильному спаданию амплитуды широкополосного максимума (ШСМ) в спектре УНЧ поля от вертикального диполя (рис.1в). В периоды минимума область с $KGO \geq 1$ имеет распределенный по высоте характер, что

приводит к расплывшейся форме ШСМ в магнитной компоненте от грозового источника (рис. 1г). Влияние суб-ИАР на поляризационный параметр ϵ фонового шума регистрируется при любом уровне солнечной активности (рис. 1 в, г). Влияние ИАР на амплитуду и поляризацию УНЧ магнитных полей наблюдается в периоды, когда КГО ≥ 1 на верхнем основании слоя F в период, близкий к минимуму солнечной активности (рис. 1б, в, г). Подъем амплитуды на резонансных частотах РСС и ШСМ также имеет место в спектрах искусственного сигнала [2]. На рис.2 приведены примеры модельных спектров амплитуды магнитных компонент СЮ и В3 (а, б) и ϵ (г) для разного вида источников для периода, когда отчетливо наблюдалось влияние суб-ИАР. Спектры получены для источника с координатами 69.2 с. ш., 31.2 в. д. и приемного пункта в обсерватории НИРФИ ННГУ Старая Пустынь (PUS) 30.08.2024

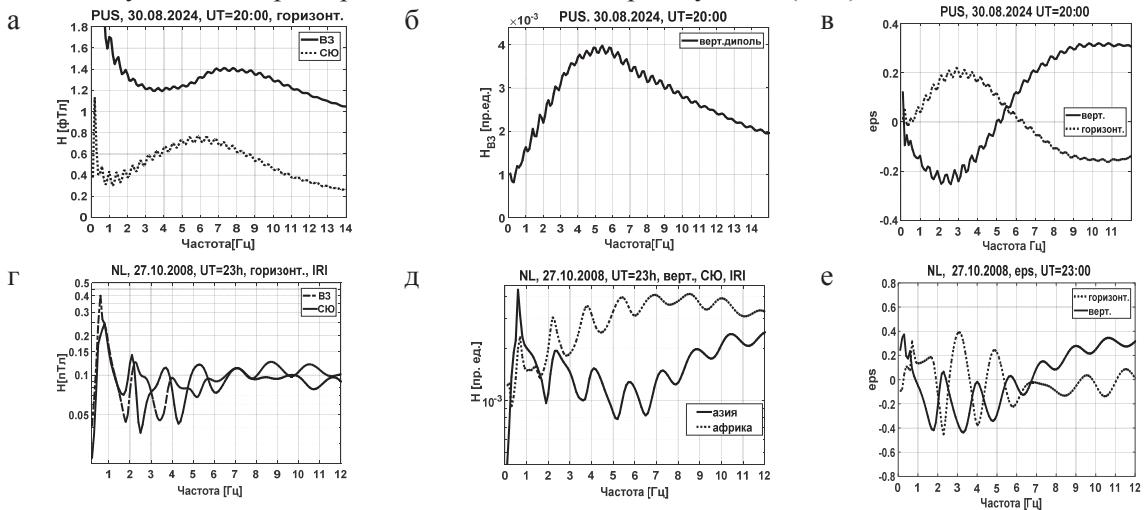


Рис. 2. Спектры магнитных компонент СЮ, В3 от горизонтального диполя (а, г) и от вертикального В3 (б) и СЮ (д), спектры параметра ϵ от разных источников (в, е).

Горизонтальная неоднородность ионосферы 30.08.2024 была связана с разной величиной электронной концентрации N_e на высотах от 80 до 300 км вдоль трассы распространения УНЧ волн. Концентрация была существенно выше в ионосфере над источником. Горизонтальная неоднородность привела к сдвигу частот максимума амплитуды в компоненте В3 в полях от разных источников на 2.5–3 Гц (рис. 2а, б), а также увеличило эллиптичность магнитного поля искусственного сигнала, абсолютная величина ϵ в максимуме составила ~ 0.2 (рис. 2в), что на порядок выше, чем значения этого параметра для однородного волновода [2]. На рис. 2 г, д, е показаны модельные спектры УНЧ волн от разных источников в условиях высокодобротного ИАР 27.10.2008. Регистрация сигналов и фонового шума происходила в пункте NL. В этом случае горизонтальная неоднородность, задаваемая IRI, связана с разной величиной N_e на высотах максимума слоя F и выше. Появилось смещение максимумов амплитуды в разных компонентах сигнала (рис. 2г). Для вертикального источника положение максимумов и минимумов зависит в большей степени от положения источника (рис. 2д). В случае высокой активности азиатского источника может быть существенным смещение частот максимумов РСС от разных источников. Абсолютные значения ϵ для магнитных сигналов от горизонтального диполя возрастают до величин 0.4, и вариации этой величины от разных источников идут в противофазе (рис. 2е). На рис. 3а, г приведена динамика величины сигнал/шум по данным экспериментальных кампаний 2001 и 2024 г. г. Рассмотрены два периода, когда структура суб-ИАР существовала и, когда она не обнаруживалась по данным спектрограмм и спектров ϵ шума в пункте приема (рис. 3б, в, д). В случае существования суб-ИАР наблюдается рост отношения сигнал/шум к частоте широкополосного максимума УНЧ сигнала. Это связано с тем, что частоты максимума в амплитудах шума были ниже, чем в амплитуде сигнала, или в амплитуде шума влияние суб-ИАР проявлялось слабо. Причина этого обсуждалась в [3]. На рис. 3е приведены экспериментальные спектры поляризационного параметра для сигнала (эксперимент 2024 г.) и фонового шума за этот же период времени, а также модельный спектр ϵ для УНЧ сигнала. Абсолютная величина ϵ для сигнала

увеличивается до 0.3–0.4 из-за горизонтальной неоднородности ионосферы вдоль трассы распространения низкочастотных волн (более плотная ионосфера над источником). Спектр ε для фонового УНЧ шума, который определяется влиянием локальной ионосферы, имеет другой вид (рис. 3е).

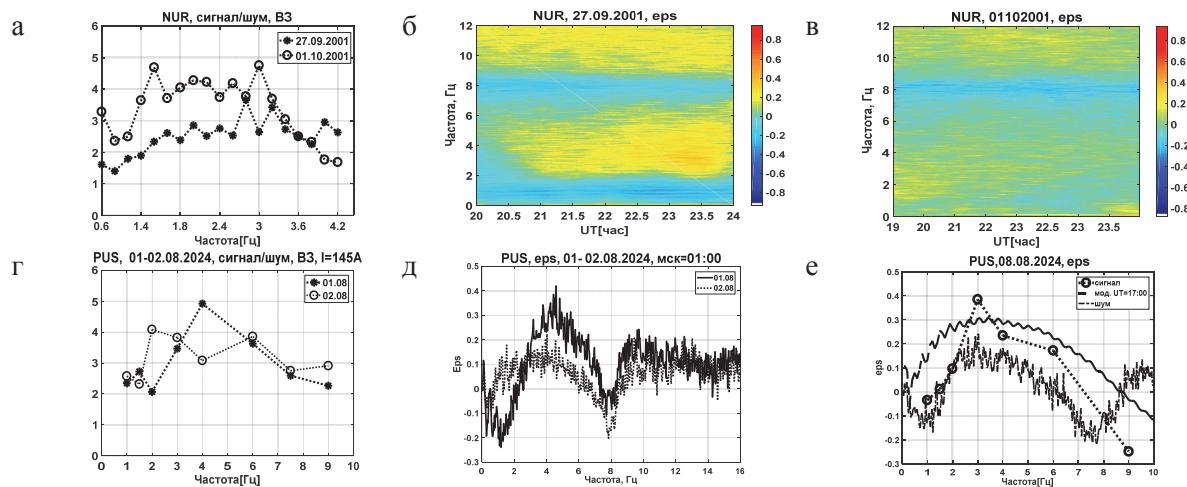


Рис. 3. Динамика сигнал/шум, эксперименты 2001 и 2024 (а, г), спектрограммы ε шума 2001г. (б, в) и спектры ε шума 2024 г. (д), экспериментальные спектры ε сигнала и шума, модельный спектр сигнала, 08.08.2024 (ж).

Заключение

Показано, что разные факторы влияют на формирование амплитудных и поляризационных спектров УНЧ магнитных полей от разных наземных источников:

– амплитудные спектры от грозовых источников формируются под действием влияния локальной ионосферы, амплитудные спектры от горизонтальных токовых линий зависят, как от свойств локальной ионосферы, так и от ее состояния вдоль всей трассы распространения низкочастотных волн. Горизонтальная неоднородность может приводить к смещению частоты максимума амплитуды из-за влияния структур ИАР и суб-ИАР в спектрах фонового шума и сигнала, что позволяет считать оптимальной частотой генерации основные частоты РСС и ШСМ в магнитных компонентах сигнала. Результаты экспериментов подтверждают, что максимальное значение величины сигнал/шум достигается на частоте максимума ШСМ в искусственном сигнале;

– поляризационные спектры искусственного УНЧ сигнала зависят от горизонтальной неоднородности ионосферы, а спектры ε от вертикального диполя формируются под влиянием локального суб-ИАР, поэтому спектры ε магнитных полей от разных источников могут сильно различаться.

Благодарности

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

Список литературы

1. Кириллов В.В., Копейкин В.Н. Формирование резонансной структуры локальной индуктивности ионосферы в диапазоне 0.1–10 Гц // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 2003. – Т. 46. – № 1. – С. 1–12.
2. Ermakova E.N., Kotik D.S., Ryabov, A.V. Characteristics of ULF magnetic fields in the 3D inhomogeneous Earth-ionosphere waveguide.// J. Geophys. Res.: Space Physics. – 2022. – 127. – e2021JA030025.
3. Ermakova E.N., Raybov A.V. Influence of ionospheric resonators on daily dynamic of the first Schumann resonance spectral parameters according to the data from a meridional chain of ULF magnetometers // Solar-Terrestrial Physics. – 2024. – Vol. 10. – Iss. 2. – P. 67–73.