УДК: 621.371/372 DOI: 10.26907/rwp29.2025.254-257

ЭФФЕКТЫ ТЕРМИНАТОРНОЙ РЕФРАКЦИИ И АВРОРАЛЬНОГО ОВАЛА В ИЗМЕРЕНИЯХ ФОНОВОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ШУМА

И.В. Крашенинников[1], О.В. Митин[1,2], В.Н. Шубин[1]

[1] *Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), 108840, Россия, Москва, Троицк, Калужское ш. 4*

[2] *Южно-Уральский государственный университет, 454080, Россия, Челябинск, пр. Ленина, 76*

E-mail:krash@izmiran.ru

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных исследований свойств фонового электромагнитного шума на частоте 4996 кГц в ИЗМИРАН, проведенных в 20024–2025 гг. в условиях высокой солнечной активности. Показана существенная сезонная зависимость суточной динамики амплитуды электромагнитного шума, в частности, проявление энергетически выгодного канала переноса атмосферной компоненты шума из тропической зоны во время прохождения утреннего и вечернего терминаторов. Отмечается специфическое проявление влияния аврорального овала в условиях сильных геомагнитных возмущений, когда овал смещается до широты Москвы. Экспериментальные данные сопоставляются с глобальной моделью шума, показана его связь с текущим состоянием ионосферы и обсуждаются вероятные физические факторы в формировании всплесков интенсивности.

Ключевые слова: ionosphere; background electromagnetic noise, radiation transfer, ionogram VIS.

EFFECTS OF TERMINATOR REFRACTION AND AURORAL OVAL IN MEASUREMENTS OF BACKGROUND ELECTROMAGNETIC NOISE

I.V. Krasheninnikov, O.V. Mitin, V.N. Shubin

Abstract. The results of experimental studies of the properties of background electromagnetic noise at 4996 kHz in IZMIRAN, conducted in 20024-2025 under conditions of high solar activity, are presented. A significant seasonal dependence of the diurnal dynamics of the electromagnetic noise amplitude is shown, in particular, the manifestation of an energetically favorable channel of transport of the atmospheric noise component from the tropical zone during the passage of the morning and evening terminators. A specific manifestation of the influence of the auroral oval under conditions of strong geomagnetic perturbations, when the oval is displaced to the latitude of Moscow, is noted. The experimental data are compared with the global noise model, its relation to the current state of the ionosphere is shown and probable physical factors in the formation of intensity bursts are discussed.

Keywords: ionosphere; background electromagnetic noise, decameter radiation transport, ionogram VIS.

Введение

Электромагнитный шум в декаметровом диапазоне радиоволн является принципиальным ограничивающим фактором в работе радиотехнических систем, использующих ионосферное прохождение радиоволн. Соотношение сигнал/шум (SNR – Signal to Nose Ratio) определяет ключевые параметры радиосистем: скорость и надежность передачи информации. В практике прогнозирования и планирования работы ионосферных радиосистем используется глобальная модель фоновых электромагнитных шумов, разработанная в 60–70-х годах на основе мировых данных их регистрации, и включающая в себя модели базовых компонент шумовых излучений: атмосферного, галактического и антропогенного происхождений [1]. Наиболее мощным источником EMN (Electromagnetic Noise) является атмосферная составляющая, интенсивность которой наиболее неустойчива. Обычно он характеризуется короткими широкополосными импульсами со случайной повторяемостью, генерируемые грозовыми разрядами преимущественно в тропической зоне. Развитие цивилизации ведет к более интенсивному применению электрических приборов и устройств в жизни и следствием может быть возрастание антропогенного фактора в EMN. Поэтому вопросы верификации современного состояния фонового электромагнитного шума и, в частности, его общего соответствия модельным представлениям являются актуальными.

Техника эксперимента и методика обработки

Регистрация уровня фонового электромагнитного шума осуществлялась SDR-приемником HackRF (динамический диапазон ~ 110 дБ) с программным управлением приемом радиосигнала и последующей его обработкой на языках программирования высокого уровня Perl и Python. Приемная антенна была реализована в виде несимметричного полуволнового диполя, имеющего диаграмму направленности с учетом подстилающей поверхности в азимутальной плоскости, близкую к круговой, а в вертикальной плоскости – слабонаправленную в зенит, с резонансом на гармониках частоты передатчика сигналов точного времени RWM – 4996 кГц. Общая длина антенны равна половине длины волны для рабочей частоты (28.51 м), отношение длин плеч диполя – 3:1. Максимальный коэффициент усиления антенны составлял 2.7 dBi, что позволило считать условия приема шумового радиосигнала практически изотропными, имеющими слабовыраженное зенитное направление. Экспериментальные реализации представляли собой получасовые наборы данных, содержащих минуту записи собственного шума радиоэфира в паузе работы передатчика RWM. После предварительной обработки каждое наблюдение было представлено в виде значения усредненной среднеквадратичной мощности шума эфира, нормированное на максимально возможное значение оцифрованного сигнала в логарифмической шкале. Выбор в качестве рабочей частоты одной из служебных частот RWM, в определенной степени, гарантировал отсутствие помехового радиоизлучения радиотехнических средств с ионосферным распространением радиоволн.

Экспериментальные результаты

Примеры регистрации суточной динамики интенсивности фонового EMN приведены на рис. 1–3 для сезонов лето (рис. 1) и зима (рис. 2), в спокойных (рис. 1,2) и возмущенных (рис. 3) ионосферных условиях.

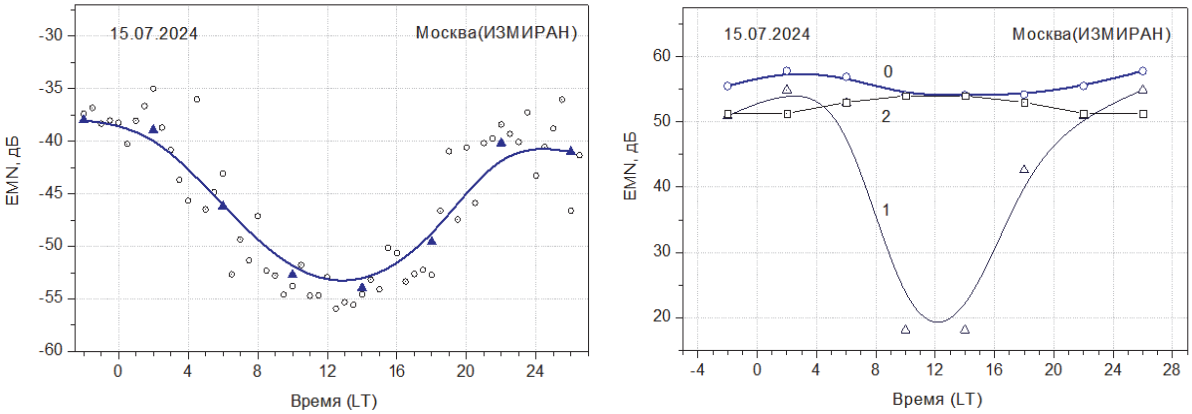

Рис. 1. Зависимость фонового ЕМ шума в летний сезон (15.07.2024): эксперимент (левая панель, в относительных единицах) и модельное представление (правая панель, 0 – суммарное значение EMN, 1 – атмосферная и 2 – антропогенная составляющие фонового ЕМ шума относительно теплового шума [1] в условиях ИЗМИРАН (уровень неиндустриального города)

Для летнего периода в условиях высокой солнечной активности, когда *foF2* не опускается ниже 5 МГц суточный ход EMN в главной части достаточно хорошо соответствует модельному описанию – максимум интенсивности шума приходится на около-полуночный, а минимум – на около-полуденный интервалы времени (рис. 1, левая панель). Однако, разность (перепад) максимального и минимального значений EMN существенно различаются – 6 дБ и 12 дБ для прогнозного (модельного) и измеренного значений соответственно.

Для зимнего сезона характер временной зависимости экспериментальных значений кардинально отличается от летнего – максимум и минимум приходятся на времена прохождения утреннего и вечернего терминаторов. В ночное время суток вместо ожидаемого максимального уровня ЕМ шума наблюдаются очень низкие значения. Из рис. 2 (правая панель) видна причина такого рассогласования – плазменная частота в максимуме слоя F2 имеет критическое значение для уровня EMN. Для *foF2* меньших 5 МГц шумовое излучение

высвечивается через ионосферу, и суммарная величина шума определяется двумя факторами: антропогенной и галактической частями, что существенно меньше прогнозируемого (модельного) значения (на ~ 5-6 дБ) с учетом атмосферной составляющей.

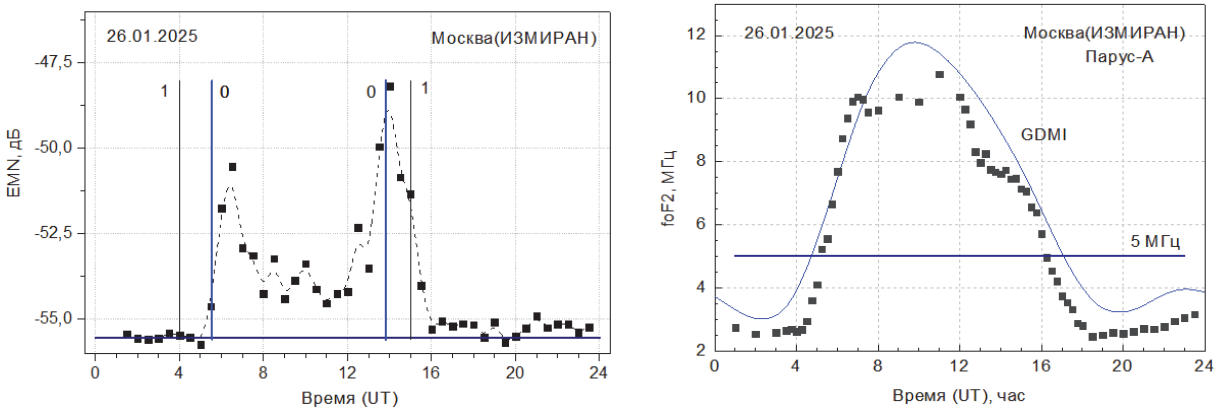

Рис. 2. Зависимость фонового ЭМ шума в зимний сезон (26.01.2025): эксперимент (левая панель) и состояние ионосферы – *foF2* (правая панель, модель GDMI – сплошная линия, квадратиками нанесены данные ионозонда “Парус-А”, и горизонтальная линия соответствует частоте 5 МГц). Вертикальными линиями отмечены времена прохождения утреннего и вечернего терминаторов (0 и 100 км высоты)

Для зимы перепад максимум-минимум составляет: ~ 4 и ~ 8 дБ для прогнозного и измеренного значений SNR соответственно. В сравнении результатов летнего и зимнего сезонов отчетливо проявляется эффект «терминаторной» рефракции – появление канала с повышенной эффективностью переноса шумового излучения из приэкваториальной зоны вдоль линии терминатора (на градиенте электронной плотности), что отмечалось исторически в исследованиях по сверхдальнему распространению радиоволн и, в частности, соответствует результатам работы [2] для практически антиподного прохождения радиоволн. Для зимнего сезона эффект «терминаторной» рефракции выражен существенно сильнее в силу того, что поперечный градиент электронной плотности на линии терминатора существенно выше, чем летом.

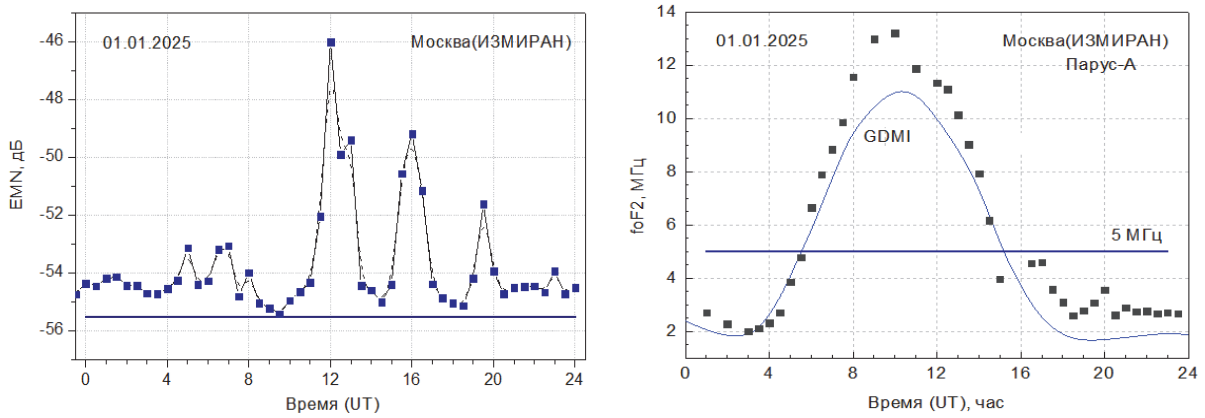

Рис. 3. Зависимость фонового ЭМ шума в зимний сезон в сильно возмущенных геомагнитных условиях (01.01.2025): эксперимент (левая панель) и *foF2* (правая панель, модель GDMI – сплошная линия, квадратики – данные ионозонда “Парус-А” и горизонтальной линией отмечена частота 5 МГц)

Другим фактором, способным повлиять на суточные вариации EMN является геомагнитная возмущенность, а именно, авроральные явления в ионосфере. То, что во время авроры генерируется шумовое радиоизлучение известно давно. Авроральная область ионосферы характеризуется интенсивным высыпанием заряженных частиц солнечного ветра, производящим как действия на квантовом уровне – ионизацию молекул атмосферных газов, так и электромагнитный шум, генерируемый циклотронным излучением и токами в среде (широкополосный шум), наиболее интенсивный в километровом диапазоне радиоволн – Auroral Kilometric Radiation (AKR) [2,3]. В силу того, что генерация радиошума происходит в

магнитосфере, его регистрация на земной поверхности является сильно проблематичной [3]. Тем не менее, в [3] отмечается регистрация ЕМ шума в полосе 3-5 МГц, связанного с авророй, и природа которого пока остается непонятной. На рис. 3 представлен пример регистрации ЕМ шума 01.01.2025 в сильную геомагнитную бурю (супербуря 01.01.2025 с Dst ~ - 210 нТ в 16-17 UTC) с предыдущей возмущенностью от 31.12.2024 с уровнем Kp ~ 4 – слабая геомагнитная буря. Вариации электронной плотности, связанные с положительной фазой возмущения ионосферы, по-видимому, ослабили градиент на терминаторе, что привело к ослаблению утреннего пика в уровне EMN (рис. 3), хотя временной ход *foF2* не показывает существенных изменений, кроме уменьшения производной по времени, т.е. косвенно и общего уменьшения градиента на терминаторе (рис. 2 и 3, правая панель). Смещение вечернего пика на более раннее время – 12 UT, по-видимому, связано с образованием глобального сильного локального градиента в 10-12 UT, как проявление отрицательной фазы супербури 01.01.2025.

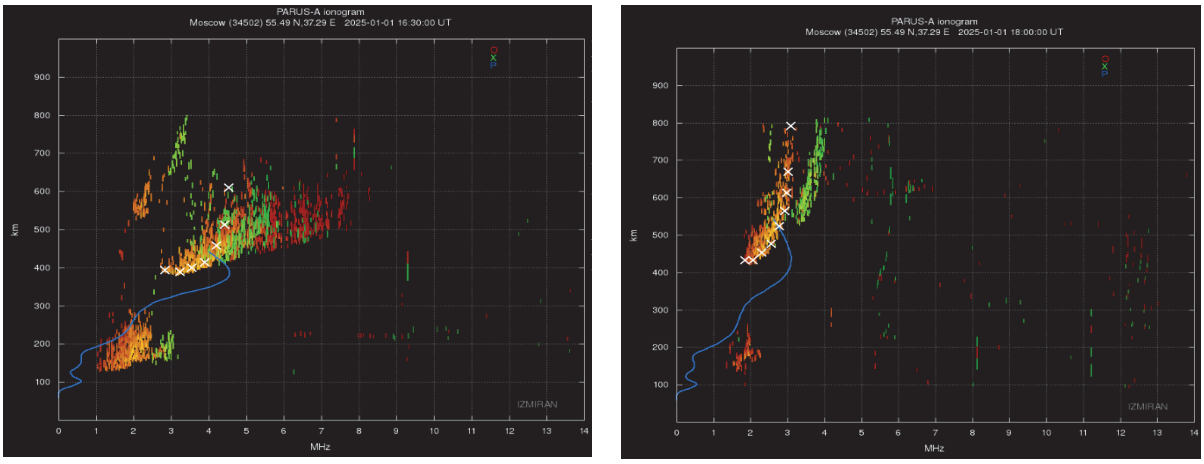

Рис. 4. Ионограммы ВЗ в 16:00 UT (левая панель) и 18:00 UT (правая панель) соответствующие положению ионозонда Москва(ИЗМИРАН) перед овалом (полярной стенкой ГИП) и внутри овала

Пики уровня EMN (рис. 3) в 16:00 и 20:00 UT связаны с близким расположением с севера полярной стенки главного ионосферного провала (ГИП) при прямом и обратном ходе олярного овала, а минимум в 18:00 UTC – с нахождением ионозонда внутри овала. Прямое и обратное прохождение овала подтверждает и расчет положения авроральных областей в модели GDMI (Global Dynamic model of the Ionosphere). Предполагаемая физическая причина – окусировочное отражение стенкой ГИП шумового потока атмосферного происхождения и барьерное непропускание его внутрь овала.

Заключение

Таким образом, в работе показаны: а) принципиальное соответствие с модельным представлением фонового электромагнитного шума по сезонам лето/зима, б) специфические вариации его уровня, вследствие возникновения энергоэффективного канала переноса шумового излучения из приэкваториальной зоны, связанного с терминатором и в) значительное локальное влияние на уровень фонового шума сильных геомагнитных возмущений.

Список литературы

1. Maslin N.M. HF Communication: A System Approach. Pitman Publishing, 1987. – 240 p.
2. Крашенинников И.В., Попов А.В., Стаханова И.Г. Анализ модовой структуры волнового поля на сверхдлинной радиотрассе Москва(РВМ) – антарктическая станция «Академик Вернадский» // Геомагнетизм и аэрономия. – 2016. – Т. 56. – № 5. – С. 662–669.
3. LaBelle J., Treumann, R.A. Auroral Radio Emissions, 1. Hisses, Roars, and Bursts // Space Science Reviews. – 2002. – V. 101. – P. 295–440. https://doi.org/10.1023/A:1020850022070
4. Harang L. Radio noise from aurora // Planetary and Space Science. – 1969. – V. 17. – No. 5. – P. 869–877. https://doi.org/10.1016/0032-0633(69)90093-2.
5. LaBelle J (2023), Radio emissions of auroral origin observable at ground level: outstanding problems // Front. Astron. Space Sci. 10:1195654.doi: 10.3389/fspas.2023.1195654 (обзор).