

ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ СТАТИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОСИГНАЛА В ДИАПАЗОНЕ КОРОТКИХ ВОЛН В ПЕРИОД ВСПЫШЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ СОЛНЦА НА ОСНОВЕ ПАССИВНОГО МОНИТОРИНГА

О.В. Митин

Южно-Уральский государственный университет
Россия, 454080, Челябинск, просп. Ленина, 76
E-mail: mitin@susu.ru

М.А. Сагадеева,

Южно-Уральский государственный университет
Россия, 454080, Челябинск, просп. Ленина, 76
E-mail: sagadeevama@susu.ru

С.А. Загребина

Южно-Уральский государственный университет
Россия, 454080, Челябинск, просп. Ленина, 76
E-mail: zagrebinasa@susu.ru

Ключевые слова: статистическая обработка данных; модель ионосферы; радиосвязь на коротких волнах; отношение «сигнал/шум»; солнечная активность.

Аннотация: В статье описывается один из возможных подходов к организации экстренной радиосвязи в диапазоне коротких волн, до сих пор активно применяющейся в практической деятельности. Установление надежной радиосвязи на коротких волнах требует оперативного учета состояния ионосферы, подверженной различным внешним воздействиям, в первую очередь, — вспышечной активности Солнца. Для прогнозирования параметров ионосферных радиотрасс необходимо использование математических моделей ионосферы. В статье автор предлагает алгоритм сбора статистических данных, на основе которых проводится анализ адекватности прогнозных моделей параметров ионосферы в период вспышечной активности Солнца, и описывает подход к организации системы пассивного радиомониторинга состояния каналов коротковолновой радиосвязи.

1. Введение

Радиосвязь как средство оперативного обмена информацией не утратило актуальности в самых различных отраслях практической деятельности человека. Безусловным преимуществом радиосвязи является ее мобильность — этот способ связи не требует повышенных капиталовложений на организацию кабельных и волоконно-

оптических магистральных каналов и доступен в ситуациях, когда использование других видов передачи данных затруднено или невозможно.

По этой причине радиосвязь до сих пор остается одним из основных видов связи экстренных и оперативно-спасательных служб. Так, в ходе выполнения спасательной деятельности по ликвидации последствий крупномасштабных чрезвычайных ситуаций (таких, как ураганы, торнадо, наводнения и т.п.) достаточно часто возникает необходимость в установлении устойчивой радиосвязи между корреспондентами, взаимное удаление которых не позволяет использовать УКВ-системы мобильной связи (удаление между корреспондентами существенно превышает расстояние прямой видимости). В качестве примера можно привести необходимость радиообмена между оперативным штабом спасательной операции и рабочими подразделениями спасателей. В таких случаях целесообразно использование средств коротковолновой (декаметровый) радиосвязи. Средняя протяженность коротковолновой радиотрассы обычно варьирует в диапазоне от сотен до нескольких тысяч километров. Это становится возможным благодаря феномену отражения коротковолнового радиосигнала от специфических слоев атмосферы с повышенным содержанием заряженных частиц (электроны, протоны), формирующихся под воздействием солнечной радиации, — ионосферы. Известно, что основным препятствием к осуществлению гарантированно устойчивой ионосферной радиосвязи между двумя удаленными корреспондентами является нестационарность и неоднородность процессов ионосферного распространения радиоволн, являющаяся результатом солнечной активности.

В данной статье приводится описание практического подхода к решению задачи оперативного планирования частотного расписания сеансов радиосвязи на основе совместного использования прогноза, полученного с помощью эмпирической модели распространения радиоволн и результатов локального (пассивного) радиомониторинга состояния среды передачи радиосигнала в периоды вспышечной активности Солнца, позволяющего вносить коррективы в радиочастотный план с учетом местных особенностей радиопрохождения в режиме реального времени.

2. Описание проблемы

Одним из основных недостатков ионосферного распространения радиоволн можно считать ярко выраженную зависимость амплитуды и формы радиосигнала от суточного хода вращения земли — с окончанием светового дня плотность концентрации активных частиц в ионосфере снижается, приводя к существенным вариациям (вплоть до потери связи) передаваемого/принимаемого радиосигнала. Эта проблема решается переходом радиооператоров с более высоких на более низкие частоты коротковолнового диапазона, — специфика коротких волн такова, что практически в любой момент времени может быть найдена рабочая частота, на которой возможна радиосвязь. Выбор рабочих радиочастот формируется на основании математического моделирования с использованием, как правило, эмпирических моделей распространения радиоволн, использующих большие массивы накопленных (как правило, усредненных) данных, описывающих параметры спокойной (невозмущенной) ионосферы на заданное время суток для данной геолокации.

Как известно, характер распространения радиоволн декаметрового (коротковолнового) диапазона в условиях спокойной (невозмущенной) ионосферы достаточно точно описывается двумя основными ее параметрами — высотой расположения того или иного слоя (D, E, F₁, F₂) ионосферы и плотностью распределения электронной концентрации N_e в слое. Собственная частота соударений электронов (плазменная частота):

$$f_N = \sqrt{80.8 \cdot N_e},$$

где f_N — плазменная частота, N_e — плотность электронной концентрации определяет максимально возможную частоту вертикально излучаемого сигнала, который еще отражается от ионосферы, не уходя в открытый космос, называемую критической частотой $f_{кр}$, определяет границу возможного распространения коротких волн и традиционно изображается в виде высотно-частотной характеристики или ионограммы (рис. 1).

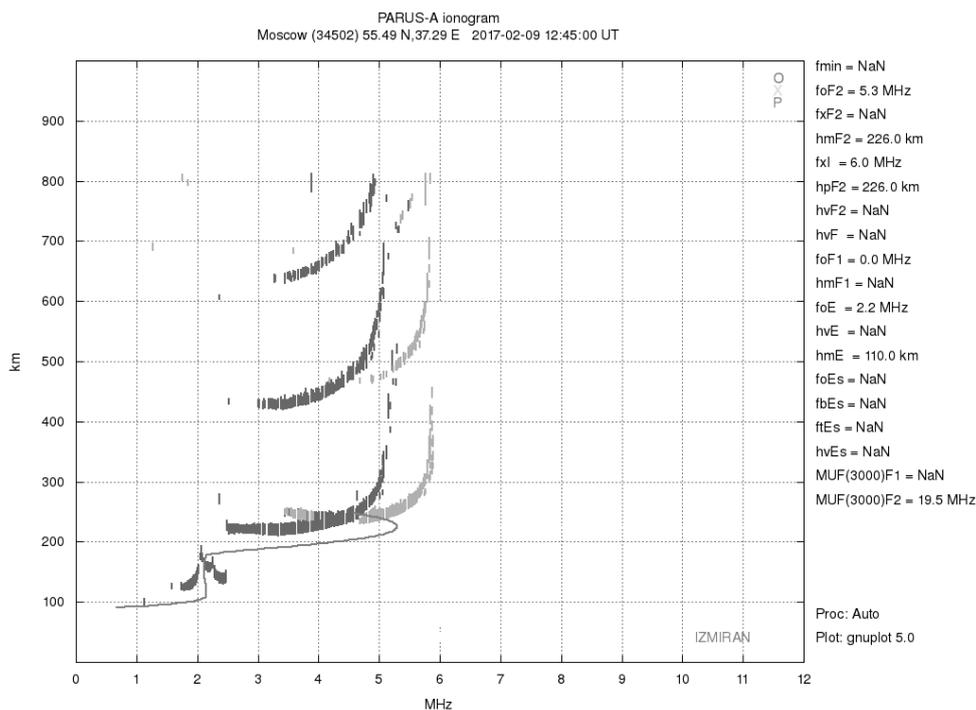


Рис. 1. Ионограмма (высотно-частотная характеристика) вертикального зондирования ионосферы (ионозонд «Парус-А», ИЗМИРАН).

Следующим существенным препятствием на пути использования коротких волн для проведения местных радиосвязей является существование «мертвой зоны» вокруг передающей радиостанции, когда расстояние между корреспондентами меньше того, которое гарантированно покрывается углом отражения передаваемого радиосигнала от ионосферного слоя. При отсутствии существенных физических препятствий в виде зданий, сооружений или рельефа местности радиосвязь в пределах «мертвой зоны» может быть проведена с использованием прямой или приземной волны, однако, сложный рельеф местности может стать причиной невозможности уверенного радиоприема. Решением данной задачи может быть использование коротковолновой радиосвязи в режиме NVIS (Near vertical incidence skywave — радиосвязь с излучением под углами, близкими к вертикальным). Этот вид коротковолновой радиосвязи может быть использован в диапазоне частот от 2 до 8 Меггерц при условии применения передающих антенн специфической конструкции (NVIS-антенны, антенны зенитной направленности) для покрытия расстояний до 600 километров.

Основная проблема установления устойчивой двусторонней радиосвязи между корреспондентами состоит в нестабильности ионосферных параметров распространения радиоволн и сильной зависимости состояния ионосферы как физической среды передачи данных от вспышечной активности Солнца. Известно, что в

периоды сильных геомагнитных возмущений, вызванных событиями на Солнце, радиопрохождение на тех или иных участках коротковолнового диапазона может быть затруднено или принципиально невозможно. Существующие математические модели, опирающиеся, как было замечено выше, на медианные значения коэффициентов, описывающих параметры ионосферы, не позволяют в полной мере оценить возможность осуществления радиосвязи в условиях возмущений ионосферы, а полученные в процессе моделирования результаты нуждаются в уточнении с учетом местных условий и состояния радиотрассы.

Выбор критериев оценки влияния солнечной активности на вариации ионосферных параметров описан многими авторами [1, 2]. Обсуждаемые в настоящей статье результаты независимых экспериментальных исследований влияния вспышечной активности Солнца на состояние ионосферы и характер распространения радиоволн декаметрового диапазона и являются продолжением работы, начатой авторами ранее [3, 4, 8].

3. Алгоритм сбора статистических данных на основе пассивного мониторинга

Для решения задачи оптимального выбора рабочих частот и контроля состояния среды передачи сигнала был осуществлен ряд экспериментальных наблюдений состояния канала передачи коротковолнового радиосигнала на фоне мониторинга вспышечной активности Солнца. В качестве объекта экспериментальных наблюдений исследовались особенности распространения радиосигнала маяка радиостанции RWM эталона точного времени «Маяк», передающего в режиме круглосуточного вещания ежеминутные циркулярные сигналы точного времени, синхронизированные с атомным эталоном времени ВНИИФТРИ. Запись экспериментальных наблюдений осуществлялась при помощи аппаратно-программного комплекса пассивного радиомониторинга состояния среды распространения радиоволн, реализованного на базе SDR-приемника HackRF и специально разработанного для решения задач эксперимента пакета прикладного программного обеспечения. Экспериментальное наблюдение осуществлялось в течение Декабря 2023 года.

Исследуемым критерием, характеризующим состояние ионосферного канала передачи радиосигнала был выбран параметр отношения «сигнал/шум» на частоте 4.996 MHz, представленный в виде временного ряда. Каждое наблюдение содержало два набора аудиоданных, полученных на стороне приема, и представляющих собой минутные фрагменты аудиogramм передачи радиомаяком тонального сигнала (NON) и аудиogramмы собственного шума эфира в отсутствие радиопередачи (рисунок 2).

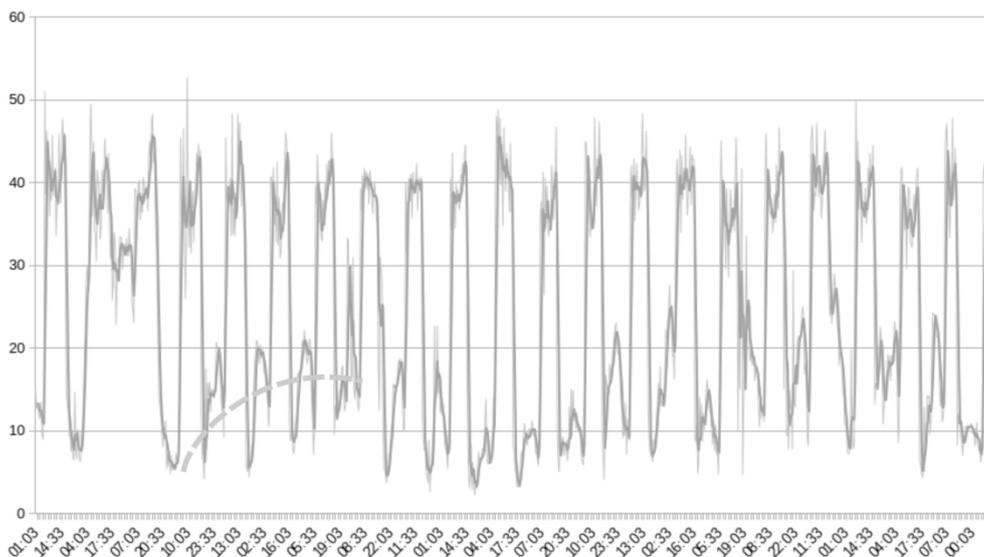


Рис. 2. График вариации отношения «сигнал/шум» за период 30.11.2023-21.12.2023.

Модельным критерием, определяющим характер суточного распространения радиоволн декаметрового диапазона, был принят параметр критической частоты слоя $FoF2$, полученный с помощью динамической модели DMNI [5, 6]. Результаты, полученные путем моделирования, верифицировались данными вертикального ионосферного зондирования (ионозонд «Парус-А, Москва, ИЗМИРАН).

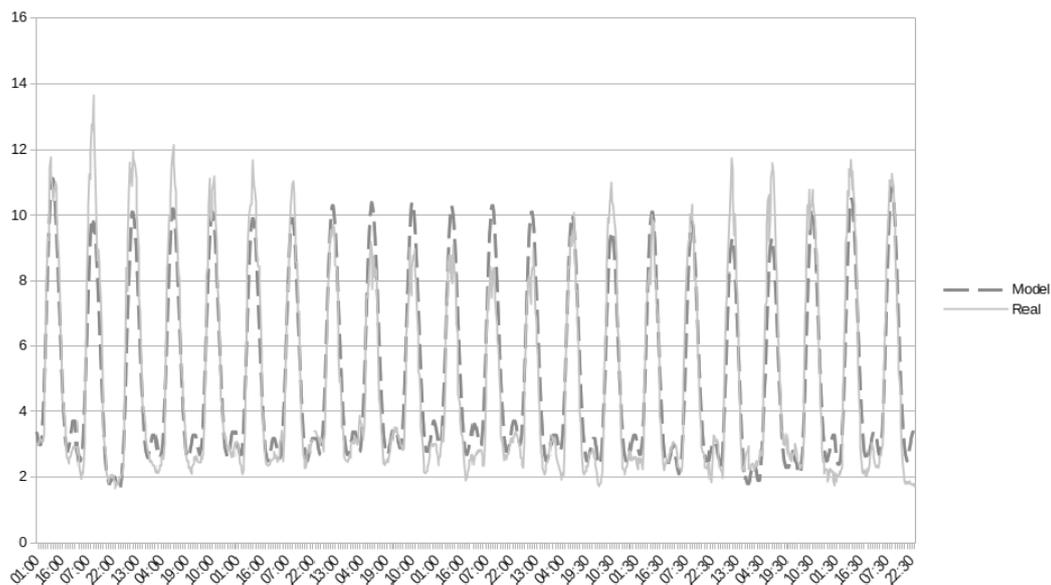


Рис. 3. График вариаций критической частоты $FoF2$, рассчитанный по модели DMNI и этот же параметр, полученный путем вертикального зондирования ионосферы для периода 30.11.2023-21.12.2023.

В качестве контрольного параметра, отражающего влияние вспышечной активности Солнца на состояние среды передачи радиосигнала, использовались данные полярного индекса PC index (Polar cap index), характеризующего геомагнитные возмущения в полярной шапке, обусловленные воздействием солнечного ветра и межпланетного магнитного поля на магнитосферу Земли [7]. График вариаций PC index за период экспериментальных наблюдений представлен на рис. 4.

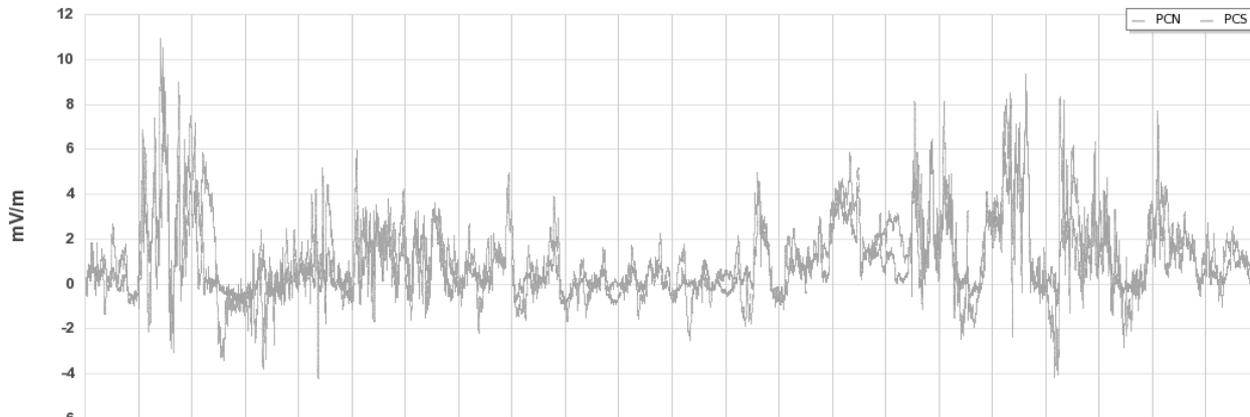


Рис. 4. Динамика поведения полярного индекса pcindex в период 30.11.2023-22.12.2023.

Мощность записанного временного ряда звукового сигнала маяка:

$$P_{signal} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{t=1}^N x_t^2,$$

где N – размерность наблюдаемого временного ряда, x_i — текущее значение амплитуды аудиосигнала в момент времени t . Аналогичным образом рассчитывалась мощность временного ряда аудиофайла собственного шума радиоэфира.

Требуемое соотношение сигнал/шум:

$$SNR = \frac{P_{signal}}{P_{noise}},$$

или

$$SNR_{db} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{signal}}{P_{noise}} \right) = 10 \log_{10}(P_{signal}) - 10 \log_{10}(P_{noise}).$$

Дальнейшие исследования показали, что изучаемые данные целесообразно разделить на два независимых набора — наблюдения на фоне спокойной (невозмущенной) ионосферы и наблюдения в периоды солнечной активности.

4. Проверка адекватности модели ионосферы

Исследуемый временной ряд отношения «сигнал/шум» содержит две независимые выборки — дневную и ночную, подчиняющимся различным физическим принципам. Дневной ход исследуемого параметра имеет ионосферную природу, в то время как ночная часть выборочной совокупности подчинена механизмам наклонно-возвратного распространения радиосигнала.

Статистический анализ экспериментальных данных продемонстрировал наличие сильной корреляционной связи (значимо высокий уровень корреляции, $r = 0.76$, $p < 0.05$) между значениями временного ряда отношения «сигнал/шум» и значениями теоретической критической частоты F2-слоя, полученными в результате моделирования на модели DMNI, и результатами практических измерений в процессе вертикального зондирования ионосферы (ионозонд «Парус-А, Москва, ИЗМИРАН), что может

свидетельствовать о синхронности суточного хода отношения «сигнал/шум» и вариаций параметра FoF2, являясь, в свою очередь, подтверждением «ионосферного» характера исследуемого явления.

Анализ отклика исследуемого отношения «сигнал/шум» на события солнечной активности выявил наличие положительной корреляционной связи между исследуемым параметром (трехчасовые и суточные вариации) и индексами геомагнитной активности (K_p и A_p , коэффициент корреляции 0.84, $p < 0.05$).

Исследуемый временной ряд включает два крупных солнечно-земных события, выделенные нами особо, — диапазоны дат 1-2 Декабря и 17 Декабря отмечены как период сильной геомагнитной возмущенности. Дни развития магнитной бури 01-02 декабря (уровень бури G3, $K_p=7$), вызванной «возвращением» спустя 27 суток активной области Солнца № 3520, вызвавшей существенное расширение границ аврорального овала и обширные полярные сияния на территории большей части восточного полушария в период 5-6 ноября (рис. 5 и 6).

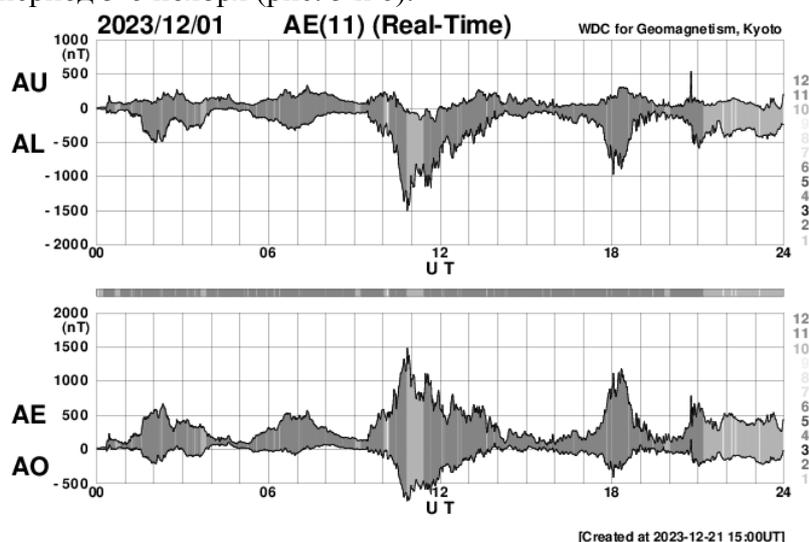


Рис. 5. Вариации значений аврорального индекса AE в течение магнитной бури 1 декабря 2023 года (по данным World Data Center for Geomagnetism, Kyoto).

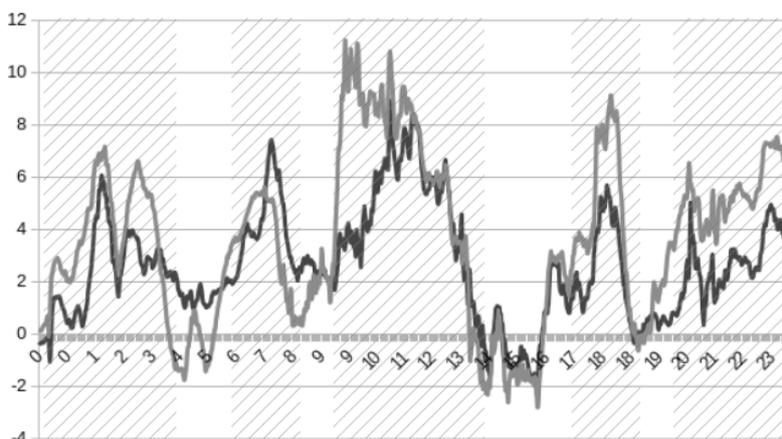


Рис. 6. Вариации полярного индекса PC-index в период в период магнитной бури 1-2 декабря.

Анализ поведения исследуемого отношения «сигнал/шум» в контексте вариаций DST-индекса (рис. 7) в период указанного события, позволил предположить существование тенденции заметного изменения уровня параметра в период протекания

активной фазы развития сильной магнитной бури в сравнении с аналогичными значениями для спокойных (невозмущенных) дней (рисунок 10). Подобная тенденция менее выражена, но при этом также прослеживается и в суббурях от 12, 14 и 17 Декабря.

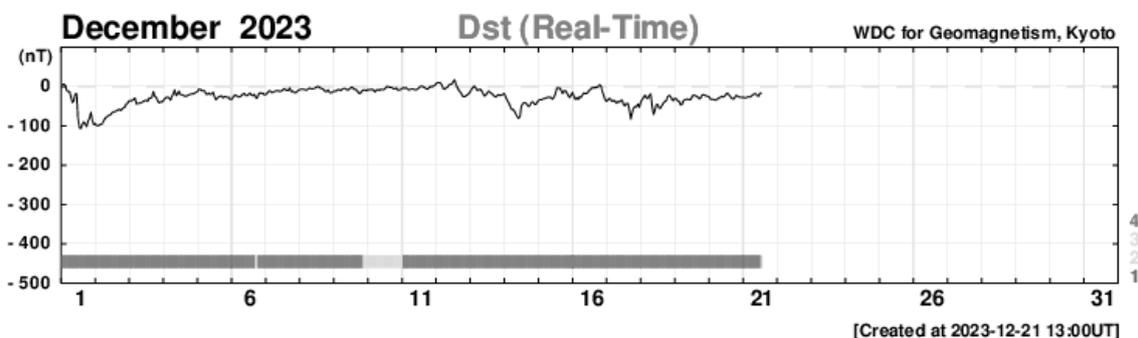


Рис. 7. График вариаций низкоширотного индекса геомагнитной активности DST в период 30.11.2023-21.12.2023 (по данным World Data Center for Geomagnetism, Kyoto). Отрицательный всплеск (до -100nT) свидетельствует в пользу развития бури.

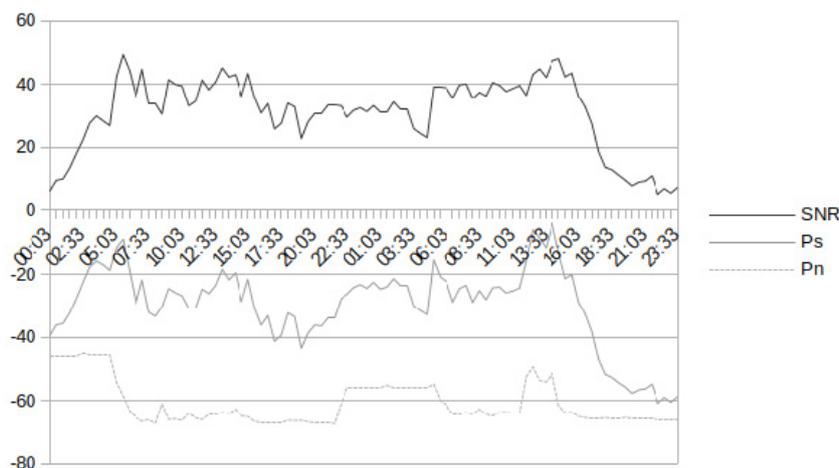


Рис. 8. Вариации отношения «сигнал/шум» в период магнитной бури 1-2 декабря. Выделяется увеличение уровня отношения «сигнал/шум» в ночные часы (30db против 10db в условиях невозмущенной ионосферы). Цветом показаны графики (сверху вниз) отношения «сигнал/шум», сигнал маяка RWM и собственный шум эфира в период отсутствия передачи.

Представляется интересным, что рисунок 2 иллюстрирует некоторое возрастание отношения «сигнал/шум» в ночной период на восстановительной фазе (рисунок 8) развития бури 1-2 Декабря, заслуживающее отдельного рассмотрения. Практическое изучение аудиограмм ночного периода в дни развития геомагнитных бурь (суббурь), — за исключением событий вспышечной активности, приводящих к полному блэкауту, — показало, что сигнал маяка RWM не теряется на фоне помех и шумов ночного эфира, а устойчиво выделяется на слух в периоды активных событий на Солнце.

5. Выводы

Динамика суточных вариаций исследуемого отношения «сигнал/шум» достоверно согласуется как с результатами математической модели ДМНІ, так и с данными вертикального зондирования ионосферы (иозонд «Парус-А», Москва), что

подтверждает корректность и применимость модели DMHI к условиям NVIS радиопрохождения и свидетельствует о «ионосферной» природе отношения «сигнал/шум».

Следует отметить, что математическая модель не объясняет полностью все наблюдаемые вариации амплитудных значений исследуемого сигнала в силу существенной зависимости состояния ионосферного канала передачи от вспышечной активности Солнца. При этом отклик на крупные геомагнитные бури и суббури достаточно отчетливо распознается во временном ходе исследуемого параметра, что позволяет использовать отношение «сигнал/шум» как критерий, уточняющий расчетные значения параметров ионосферы.

Таким образом, экспериментальным исследованием была апробирована и подтверждена эффективность пассивного мониторинга состояния ионосферного канала декаметрового участка передачи радиосигналов в локальной точке радиоприема для уточнения модельного прогноза распространения радиоволн.

Список литературы

1. Buzás A., Kouba D., Mielich J., Burešová D., Mošna Z., Koucká Knížová P., Barta V. Investigating the effect of large solar flares on the ionosphere based on novel Digisonde data comparing three different methods, 2023.
2. de Paula V., Segarra A., Altadill D., Curto J.J., Blanch E. Detection of Solar Flares from the Analysis of Signal-to-Noise Ratio Recorded by Digisonde at Mid-Latitudes // *Remote Sens.* 2022. Vol. 14. P. 1898. <https://doi.org/10.3390/>.
3. Mitin O.V. Analysis of the Empirical Median Ionosphere Model Constructed Using IRI Local Passive Radiosounding Data // *Journal of Computational and Engineering Mathematics.* 2023. Vol. 10, No. 2. P. 52-62. DOI: 10.14529/jcem230205.
4. Sagadeeva M.A., Mitin O.V. Construction of observations based on data distorted by interference of various types // *Journal of Computational and Engineering Mathematics.* 2021. Vol. 8, No. 4. P. 9-16. DOI: 10.14529/jcem210402.
5. Shubin V.N. Global empirical model of critical frequency of the ionospheric F2-layer for quiet geomagnetic conditions // *Geomagnetism and Aeronomy.* 2017. Vol. 57, No. 4. P. 414-425. DOI: 10.1134/S0016793217040181.
6. Shubin V.N., Krasheninnikov I.V., Merzly A.M., Reznikov A.E., Yanakov A.T., Tikhonov M.V. Dynamic Model of the High-latitude Ionosphere (DMHI): Certificate of the computer program state registration No. 2021616554 Russian Federation. 22.04.2021; applicant Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe uchrezhdenie nauki Institut kosmicheskikh issledovanij Rossijskoj akademii nauk [Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Space Research of the Russian Academy of Sciences], 2021.
7. Troshichev O.A., Sormakov D.A. PC index as a proxy of the solar wind energy that entered into the magnetosphere (summary) // *Problemy Arktiki i Antarktiki. Arctic and Antarctic Research.* 2019. Vol. 65, No. 3. P. 275–299. DOI: 10.30758/0555-2648-2019-65-3-275-299.
8. Митин О.В., Сагадеева М.А., Загребина С.А. Исследование возможности уточнения результатов эмпирических моделей ионосферы локальными данными, получаемыми в режиме реального времени // В книге: Управление в морских системах (УМС-2022). 15-я Мультиконференция по проблемам управления. Материалы конференции. Санкт-Петербург, 2022. С. 11-19.