

УДК 551.509.329:590.21
КП 72.19.50-00.00
№ держреєстрації 0118U003985
Інв. №

Національна академія наук України
Державне космічне агентство України
Інститут космічних досліджень
(ІКД)

03187, Київ, проспект Академіка Глушкова, 40, корпус 4/1;
тел./факс: (044) 526 41 24, e-mail: ikd@ikd.kiev.ua, <http://www.ikd.kiev.ua/>

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор
Інституту космічних досліджень
НАН України та ДКА України
чл.-кор. НАН України

О.П. Федоров

ЗВІТ
ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ
«Інформаційний сервіс космічної погоди»
Етап 1: Попередні дослідження
(заключний)

Том I. Допрацювання методики прогнозування локальних геомагнітних збурень та її валідація на основі міжнародних даних. Попередній аналіз можливості діагностики іоносферних збурень за даними вимірювань ДНЧ-радіохвиль та дослідження сезонних залежностей завад проходженню ДНЧ-радіосигналів.

Керівник НДР
старший науковий співробітник
лабораторії супутникових досліджень
ближнього космосу,
кандидат фіз.-мат. наук, с.н.с.

О. Парновський

2018

Рукопис закінчено 30 листопада 2018 р.

Результати цієї роботи розглянуто Вченою радою ІКД НАН України та ДКА України, протокол від _____.____.2018 №

СПИСОК АВТОРІВ

Науковий керівник

ст. наук. співроб.

канд. фіз.-мат. наук, с.н.с.

О.С. Парновський

(вступ, розділ 1, висновки)

Відповідальний виконавець розділу

пров. інж.

Д.І. Власов

(розділ 1)

зав. лабораторії

канд. фіз.-мат. наук, с.н.с.

Г.В. Лізунов

(розділ 1)

наук. співроб.

Т.В. Скороход

(розділ 1, редагування)

мол. наук. співроб.

О.В. П'янкова

(розділ 1)

СПИСОК АВТОРІВ

(прод.)

Відповідальний виконавець розділу

гол. наук. співроб.

докт. фіз.-мат. наук, проф.

О.К. Черемних

(розділ 2)

ст. наук. співроб.,

канд. фіз.-мат. наук

А.К. Федоренко

(розділ 2)

ст. наук. співроб.,

канд. тех. наук, с.н.с.

Є.І. Крючков

(розділ 2)

ст. наук. співроб.,

канд. фіз.-мат. наук

А.Д. Войцеховська

(розділ 2)

РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 2 томи, 82 стор., 33 рис., 4 табл., 31 джерел.

Об'єкт дослідження — космічна погода.

Мета роботи — Допрацювання, валідація та адаптація для застосування в інтересах вітчизняних користувачів існуючих моделей та методик в сфері космічної погоди, а також розроблення програмного забезпечення на їх основі для підготовки до впровадження в оперативну практику.

Методи дослідження — експериментальні: радіофізичні, магнітометричні; теоретичні: математичні, статистичні.

В даному звіті описано результати допрацювання методики прогнозування локальних геомагнітних збурень та її валідації на основі міжнародних даних, попереднього аналізу можливості діагностики іоносферних збурень за даними вимірювань ДНЧ-радіохвиль та дослідження сезонних залежностей завад проходженню ДНЧ-радіосигналів (том I), а також систематизації та аналізу експериментальних даних харківського радара некогерентного розсіяння та іонозонду, проведення експериментальних досліджень для поповнення бази іоносферних даних та оновлення модельних блоків регіональної моделі іоносфери CERIM ION (том II).

КОСМІЧНА ПОГОДА, МОНІТОРИНГ, ПРОГНОЗУВАННЯ, ГЕОМАГНІТНІ ЗБУРЕННЯ, РАДІОЗОНДУВАННЯ, МАГНІТНЕ ПОЛЕ ЗЕМЛІ, ІОНОСФЕРА

Умови одержання звіту: за договором. 01030, м. Київ, вул. Володимирська, 54;
тел.: (044) 239 64 44, факс: (044) 234 32 43, e-mail: prez@nas.gov.ua

ЗМІСТ

Список авторів	2
Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів	6
Передмова	8
Вступ	9
1 Допрацювання методики прогнозування локальних геомагнітних збурень та її валідація на основі міжнародних даних.....	11
1.1 Допрацювання методики прогнозування локальних геомагнітних збурень	11
1.2 Валідація методики прогнозування локальних геомагнітних збурень на основі міжнародних даних	13
2. Попередній аналіз можливості діагностики іоносферних збурень за даними вимірювань ДНЧ-радіохвиль та дослідження сезонних залежностей завад проходженню ДНЧ-радіосигналів	17
2.1 Особливості спостережень іоносферних збурень за вимірами ДНЧ радіосигналів	17
2.2 Флуктуації амплітуд ДНЧ радіосигналів при зміні висоти відбиття	20
2.3 Результати спостережень флуктуацій амплітуд	26
2.4. Зв'язок флуктуацій амплітуд ДНЧ радіохвиль з концентрацією електронів в іоносфері	29
2.5 Висновки до розділу 2	32
Висновки	34
Перелік використаних джерел	35

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ДКА	Державне космічне агентство
ІГФ	Інститут геофізики ім. С.І. Суботіна
ІКД	Інститут космічних досліджень
КА	космічний апарат
ЛЕП	лінія електропередач
НАН	Національна академія наук
СКВ	середньоквадратичне відхилення
ACE	Advanced Composition Explorer
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
AFFECTS	Advanced Forecast For Ensuring Communications Through Space
EU	European Union (Європейський Союз)
FP7	EU 7 th Framework Programme for Scientific and Technological Development (7-а рамкова програма Європейського Союзу з науково-технологічного розвитку)
MAG	magnetometer (магнітометр)
NARX	nonlinear autoregression with exogenous inputs (нелінійна авторегресійна модель з зовнішніми входами)
PAE	physical address extension (розширення фізичного адресного простору)
SIDC	Solar Influences Data Centre (Центр даних з сонячних впливів)
STAFF	Solar Timelines viewer for AFFECTS
SVD	singular value decomposition (розклад за сингулярними значеннями)
SWERAM	Solar Wind Electron, Proton, and Alpha Monitor (монітор електронів, протонів та альфа-частинок у сонячному вітрі)
UTC	universal coordinated time (всесвітній скоординований час)

WDC	world data center (світовий центр даних)
XML	Extensible Markup Language
D_{ST}	disturbance storm-time (планетарний геомагнітний індекс, що відображає скориговану середньозважену варіацію північного компонента вектора магнітної індукції на 4 низькоширотних магнітних обсерваторіях та пов'язується з інтенсивністю екваторіального електроджету та західного кільцевого струму)
K_p	planetarische Kennziffer (планетарний геомагнітний індекс, що відображає усереднене складним чином значення максимальної за 3 години амплітуди змін геомагнітного поля на 13 середньо- та високоширотних магнітних обсерваторіях)

ПЕРЕДМОВА

Цей звіт складено Інститутом космічних досліджень НАН України та ДКА України за результатами виконання науково-дослідної роботи за договором від 08.02.2018р. № 4-02/18 відповідно до Цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень на 2018-2022 рр. та розпорядження Президії НАН України від 07.02.2018 № 75.

У даний звіт включено роботи, обсяг та строки виконання яких визначені пп. 1 та 2 календарного плану (п. 8 Технічного завдання) виконання вказаної НДР. Звіт про роботи, визначені п. 3 календарного плану, що виконувалися субвиконавцем — Інститутом іоносфери, оформлено окремим томом.

ВСТУП

З розвитком космічної погоди як практичної галузі з'явився суспільний запит на створення географічно деталізованих оперативних прогнозів космічної погоди. Фахівці з США та ЄС пішли шляхом детального комп'ютерного моделювання фізичних процесів в околі Землі (моделі WSA/Enlil, GeoSpace, WAM-IPE тощо), яке може потенційно дати дуже високу точність, але вимагає залучення надзвичайно великих обчислювальних ресурсів ($\sim 10^{18}$ операцій/с). Через відсутність в Україні обчислювальних систем порівняної потужності та навіть планів щодо їх створення, єдиною реальною можливістю створення аналогічних прогнозних моделей залишається використання методів машинного навчання, які здатні забезпечити порівняні за точністю результати з використанням значно менших ресурсів.

Наявна світова мережа передавачів та приймачів ДНЧ радіохвиль, відкриває широкі можливості для глобального моніторингу та діагностики стану нижньої іоносфери в режимі реального часу. Поширення ДНЧ радіохвиль відбувається у хвилеводі Земля-іоносфера з висотою відбиття вдень на висотах $\sim 70\text{--}74$ км (D-область іоносфери), а вночі на висотах $\sim 85\text{--}90$ км (E-область). Вказаний інтервал іоносферних висот є важкодоступним для інших експериментальних методів, а фізика процесів в нижній іоносфері є значно менше вивченою, ніж у більш високих областях.

В ході виконання роботи проаналізовано можливості діагностики іоносферних збурень за вимірами амплітуд ДНЧ радіосигналів. Для цього використано дані вимірювань ДНЧ передавачів на декількох середньо-широтних станціях в Німеччині, Великобританії та Італії з пунктом прийому у Франції (A118). На основі цих даних досліджено зв'язок флуктуацій амплітуд ДНЧ радіосигналів з параметрами іоносфери. Отримано співвідношення, які дозволяють розрахувати зміщення ефективної висоти відбиття та флуктуації електронної концентрації в іоносфері за вимірами амплітуд радіосигналів.

Дана робота є продовженням робіт за даною тематикою, що велись в ІКД НАН України та ДКА України в рамках вітчизняних та міжнародних проектів та грантів, відомчої та конкурсної тематики НАН України, договорів з іншими замовниками, а також в ініціативному порядку.

Дані магнітних обсерваторій Шамбон-ля-Форе (CLF) та Боулдер (BOU) були надані мережею INTERMAGNET, а також співробітниками відповідних магнітних обсерваторій.

Дані космічного апарату ACE були надані Науковим центром ACE, а також розробниками інструментів MAG та SWEPAM на космічному апараті ACE.

1 ДОПРАЦЮВАННЯ МЕТОДИКИ ПРОГНОЗУВАННЯ ЛОКАЛЬНИХ ГЕОМАГНІТНИХ ЗБУРЕНЬ ТА ЇЇ ВАЛІДАЦІЯ НА ОСНОВІ МІЖНАРОДНИХ ДАНИХ

1.1 Допрацювання методики прогнозування локальних геомагнітних збурень

Перша спроба прогнозування локальних геомагнітних збурень в ході виконання одним з авторів пошукових досліджень в рамках НДР «Прогнозування локальних геомагнітних збурень на території України» [1], яка виконувалась у 2015 році, виявилась невдалою: середньоквадратична похибка прогнозу виявилась більшою, ніж навіть у референтного прогнозу, який передбачає незмінність прогнозованої величини з моменту останнього виміру. Були названі дві можливі причини такого результату.

Першою ймовірною причиною називався недостатній обсяг навчальної вибірки, що покривала лише один 11-річний цикл сонячної активності. Це можна пояснити наступним чином. Парні та непарні цикли сонячної активності відрізняються за своїм перебігом (правило Гневишева–Оля) через відому асиметрію північної та південної півкуль Сонця. Тому, 22-річна вибірка, що охоплює обидва режими сонячної активності, є репрезентативною, а 11-річна — ні. Такий обсяг вибірки був обумовлений використанням даних геомагнітної обсерваторії «Львів» (LVV), які на той час були доступні у цифровому форматі лише з 2004 року.

Другою ймовірною причиною називався вплив антропогенних факторів, які неможливо врахувати у прогнозних моделях. Мова йде про збурення, викликані змінами навантаження в ЛЕП, рухом поїздів, діяльністю людей в безпосередній близькості від магнітної обсерваторії тощо.

Крім того, в роботі 2015 року та моделях для прогнозування планетарних індексів при застосуванні методу регресійного моделювання [2] параметрична

ідентифікація моделей проводилась шляхом ортогоналізації матриці Фішера методом Гауса-Жордана [3], що призводило до двох суттєвих проблем при структурній ідентифікації.

Перша проблема полягала у тому, що до структури потрапляли регресори, які описували випадкові шуми, специфічні для навчальної вибірки (т.зв. проблема оверфітінгу). Для подолання цієї проблеми вводилося додаткове відкидання незначущих регресорів на тестовій вибірці.

Друга проблема полягала у помилковому відкиданні значущих регресорів через погану обумовленість матриці Фішера, яка викликана суттєвою неортогональністю вхідних параметрів. Для боротьби з цією проблемою доводилося вводити додаткові перевірки колективної та попарної значимості регресорів, помічених як незначущі, що збільшувало час налаштування однієї моделі з декількох годин до майже тижня і, тим не менше, не гарантувало повної відсутності помилкових відкидань.

В даній роботі замість використання матриці Фішера та її ортогоналізації був використаний розклад за сингулярними значеннями (SVD) інформаційної матриці, який позбавлений описаних вище недоліків [3]. Натомість, він вимагає зберігання в оперативної пам'яті приблизно в 1000 разів більшого обсягу інформації, ніж при використанні матриці Фішера, і, за типових значень параметрів, перевищує межу у 2 ГБ, доступну для 32-розрядних процесів без використання технології PAE. Крім того, на відміну від методу Гауса-Жордана, він не дозволяє напряму отримати коваріаційну матрицю, а, отже, і похибку прогнозу. Перша з цих проблем була вирішена шляхом переходу на 64-розрядну версію компілятора gfortran з пакету gcc, а друга була визнана несуттєвою.

Ці зміни в методиці були перевірені на моделі для прогнозування планетарного геомагнітного індексу D_{ST} з випередженням 3 години. Було встановлено, що результати прогнозування не відрізняються від отриманих за старою методикою, а час налаштування моделей знизився з майже тижня до декількох годин. Ці результати детально описані в роботі [4].

1.2 Валідація методики прогнозування локальних геомагнітних збурень на основі міжнародних даних

Для побудови моделей були використані значно довші вибірки даних з магнітних обсерваторій Шамбон-ля-Форе, Франція (CLF) та Боулдер, США (BOU), які розташовані на геомагнітних широтах близьких до геомагнітних широт магнітних обсерваторій на території України. Для обох обсерваторій використовувались такі вибірки даних:

навчальна з 1976 по 2000 рр.;

тестова з 2001 по 2008 рр.;

екзаменаційна з 2009 по 2017 рр.

Дані до 1976 року не використовувалися через нерегулярність вимірювань параметрів сонячного вітру до початку роботи КА ISEE 3. Як і раніше, використовувались дані з часовим розділенням 1 відлік на годину.

В результаті застосування методики були отримані прогнозні моделі з випередженням 3 години для кожного з геомагнітних елементів на кожній з обсерваторій (всього шість моделей). В таблиці 1.1 наведено їхні статистичні характеристики, визначені на екзаменаційній вибірці, а також аналогічні характеристики прогнозу планетарного індексу D_{ST} на вибірці з 2009 по 2016 роки з роботи [4] для порівняння. Визначення наведених характеристик див. у [5].

Таблиця 1.1

Станція, елемент	Ефективність прогнозу	К-т лінійної кореляції	Відносне зменшення СКВ
CLF, X	0,846	0,914	0,335
CLF, Y	0,823	0,901	0,235
CLF, Z	0,801	0,904	0,179
BOU, X	0,826	0,854	0,155
BOU, Y	0,803	0,841	0,135
BOU, Z	0,801	0,834	0,099
D_{ST}	0,851	0,921	0,341

На рисунках 1.1–1.3 зображено приклади прогнозування геомагнітних елементів X , Y та Z відповідно на обох обсерваторіях під час найсильніших магнітних бурь за період, що відповідає екзаменаційній вибірці.

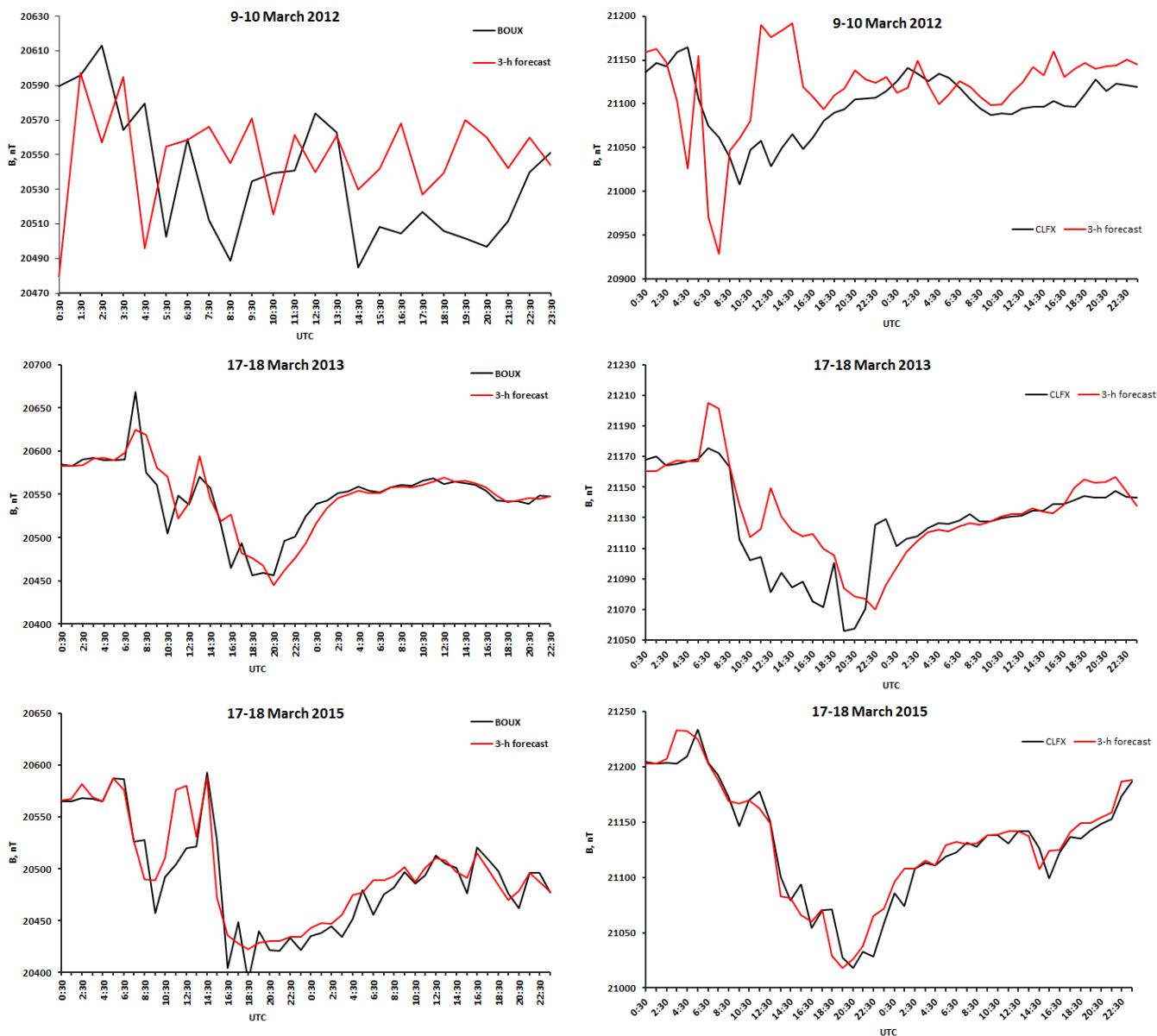


Рисунок 1.1 — результати прогнозування геомагнітного елементу X з випередженням 3 години на магнітних обсерваторіях BOU (ліва колонка) та CLF (права колонка) для магнітних бурь 09–10.03.2012 (верхній рядок), 17–18.03.2013 (середній рядок) та 17–18.03.2015 (нижній рядок).

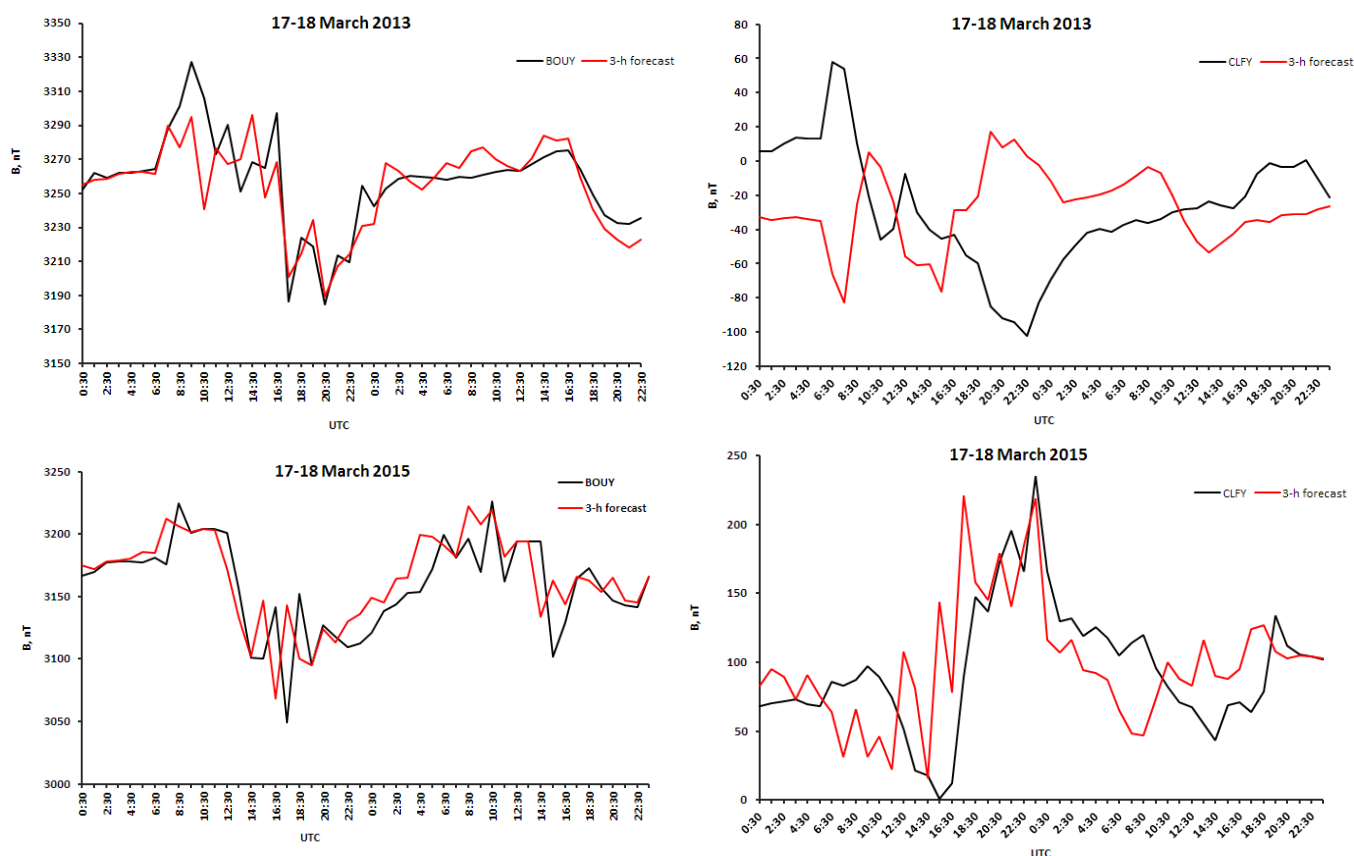


Рисунок 1.2 — результати прогнозування геомагнітного елементу Y з випередженням 3 години на магнітних обсерваторіях BOU (ліва колонка) та CLF (права колонка) для магнітних бурь 17–18.03.2013 (верхній рядок) та 17–18.03.2015 (нижній рядок).

Низька точність прогнозу під час події 2012 року пояснюється значно заниженими даними про швидкість сонячного вітру через вплив протонної події на прилад SWEPAM на борту КА ACE: він показував значення близько 300 км/с при тому, що розташовані поруч КА SOHO та WIND показували значення понад 800 км/с. Тому, для цієї події наведено прогноз лише геомагнітного елементу X в якості ілюстрації. Слід зазначити, що жодна з моделей інших авторів не змогла видати хоча б якийсь прогноз для цієї події.

Причини дещо неадекватного прогнозу події 2013 року для обсерваторії CLF наразі не встановлено. Ймовірні причини включають техногенний вплив від зміни навантаження в кільці ЛЕП, що оточує цю обсерваторію, пов'язану з тим, що 17 березня 2013 р. припадало на неділю, а 18, відповідно, — на понеділок.

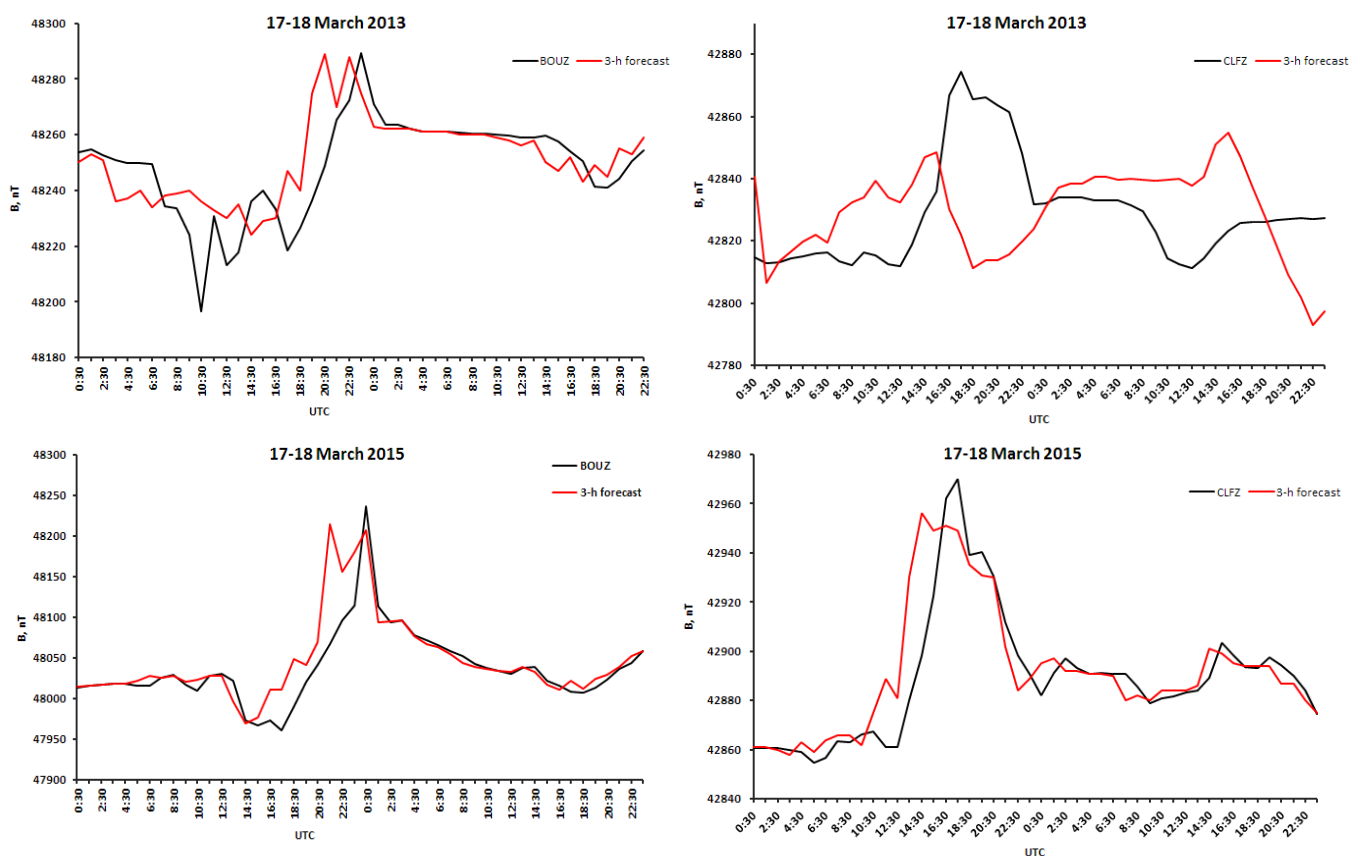


Рисунок 1.3 — результати прогнозування геомагнітного елементу Z з випередженням 3 години на магнітних обсерваторіях BOU (ліва колонка) та CLF (права колонка) для магнітних бурь 17–18.03.2013 (верхній рядок) та 17–18.03.2015 (нижній рядок).

1.3 Висновки до розділу 1

Допрацьована методика прогнозування локальних геомагнітних збурень забезпечує точність прогнозу хоча і нижчу за аналогічні прогнози планетарних індексів, але порівняну з ними. Наприклад, характеристики моделі для прогнозування геомагнітного елементу X на обсерваторії CLF майже не поступаються характеристикам прогнозу індексу D_{ST} .

2. ПОПЕРЕДНІЙ АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ ДІАГНОСТИКИ ІОНОСФЕРНИХ ЗБУРЕНЬ ЗА ДАНИМИ ВИМІРЮВАНЬ ДНЧ-РАДІОХВИЛЬ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СЕЗОННИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ЗАВАД ПРОХОДЖЕННЮ ДНЧ-РАДІОСИГНАЛІВ

Дослідження іоносферних збурень за допомогою мережі передавачів ДНЧ радіохвиль є доцільним з ряду причин. По-перше, іоносферні збурення створюють завади для поширення ДНЧ радіохвиль, що обмежує точність їх застосування для технічних потреб радіозв'язку, радіонавігації, служби точного часу тощо. По-друге, наявна широка мережа ДНЧ передавачів та приймачів охоплює різні географічні регіони, що дозволяє систематично досліджувати глобальний розподіл збурень на іоносферних висотах. Дані цих досліджень можна використовувати для розв'язання наукових задач, зокрема, дослідження впливу різних факторів космічного та приземного походження на стан нижньої іоносфери та уточнення моделі іоносфери.

Поширення ДНЧ радіохвиль в земних умовах відбувається у хвилеводі Земля-іоносфера. Відбиття цих хвиль від верхньої стінки хвилеводу відбувається вдень на висотах $\sim 70-74$ км (D-область іоносфери), а вночі на висотах $\sim 85-90$ км (E-область іоносфери). В ході виконання роботи було встановлено основні ефекти, що визначають вплив іоносферних неоднорідностей на поширення ДНЧ радіохвиль та встановили зв'язок між флуктуаціями амплітуд радіохвиль з параметрами іоносфери.

2.1 Особливості спостережень іоносферних збурень за вимірами ДНЧ радіосигналів

Вплив іоносферних збурень на амплітуди та фази ДНЧ радіохвиль реалізується через зміни параметрів нейтральної атмосфери та іоносфери на висотах відбиття радіосигналів. Взаємодія ДНЧ радіохвиль з іоносферою переважно

визначається наступними чинниками: концентрацією електронів на рівні відбиття, висотним градієнтом електронної концентрації і частотою зіткнень електронів з нейтральними частинками [1]. Загальний цикл хімічних реакцій, що включає продукцію і втрати електронів, залежності швидкостей цих реакцій від параметрів нейтральної атмосфери та іоносфери є дуже складними.

Для теоретичного дослідження поширення ДНЧ радіохвиль у хвилеводі Земля-іоносфера застосовують два основних підходи: теорію мод [2] а wave-hop theory (наближення геометричної оптики) [6]. В теорії мод досліджуються властивості хвилеводу в цілому на всій його протяжності від передатчика до приймача. В рамках цієї теорії розроблено спеціальне програмне забезпечення для розрахунку електронної концентрації та градієнту електронної концентрації в залежності від геометрії траси та з врахуванням гео- та геліофізичних умов [3]. Цей метод активно використовується для дослідження іоносфери за реакцією ДНЧ радіосигналів на сонячні спалахи [4]. Сонячні рентгенівські спалахи радикально впливають на стан нижньої іоносфери. Зокрема, під час спалахів рівень іонізації в D області може зростати на 2-3 порядки, а також часто виникають різкі висотні градієнти концентрації. Сонячний рентгенівський спалах є своєрідними «тестовим» збуренням іоносфери, яке носить глобальний характер і охоплює всю освітлену півкулю. Реакція іоносфери на сонячний спалах є прогнозованою. Проте існують флуктуації радіосигналів, викликані багатьма іншими чинниками, вплив яких вивчено недостатньо.

Так, в нічні години систематично спостерігаються квазіперіодичні флуктуації амплітуд радіосигналів з періодами в десятки хвилин. Амплітуди цих флуктуацій є співставними з відгуком амплітуд радіосигналів на сонячний спалах вдень. Найбільш імовірно ці флуктуації амплітуд радіосигналів обумовлені поширенням АГХ на іоносферних висотах. Ці флуктуації впливають на амплітуди і фази прийнятих сигналів, переважно через періодичні зміни ефективної висоти відбиття, що призводить до зміни характеру інтерференції відбитих від іоносфери хвиль з приземною хвилею.

Для локальних іоносферних збурень з масштабами в десятки-сотні кілометрів,

в тому числі, викликаних поширенням АГХ від точкових джерел енерговиділення, краще підходить wave-hop theory. Цей метод дозволяє локалізувати збурення вздовж траси, що значно покращує шанси пов'язати спостережуване збурення з конкретним джерелом. Наближення геометричної оптики можна застосовувати на відносно коротких трасах (<1500 км), для яких амплітуду прийнятого радіосигналу можна розглядати як суперпозицію приземної хвилі та кількох іоносферних хвиль. Цей підхід дозволяє краще зрозуміти фізику процесів, що відбуваються в іоносфері на рівні відбиття радіосигналів.

На рис 2.1 показано добовий хід амплітуд ДНЧ сигналів на 4-х трасах в пункті прийому A118 (дані завантажено з сайту <https://sidstation.loudet.org/data>). В момент часу $\sim 11^{\text{h}}$ UT спостерігається помітний відгук амплітуди на сонячний спалах класу M3.7. Як видно з рис. 2.1, реакція амплітуд сигналів на однакове збурення на різних трасах є різною. Максимальні і позитивні (зі збільшенням амплітуди) відгуки на сонячний спалах спостерігаються для передавачів ICV (Італія, $f=20.74$ кГц) і DHO38 (Німеччина, $f=23.4$ кГц), для GQD (Великобританія, $f=22.1$ кГц) відгук є найменшим по амплітуді, а на трасі GBZ-A118, на відміну від трьох інших, відгук на спалах проявляється у зменшенні амплітуди сигналу. В нічні години квазіперіодичні флуктуації амплітуд спостерігаються фактично впродовж всієї ночі, також з різними амплітудами в залежності від траси.

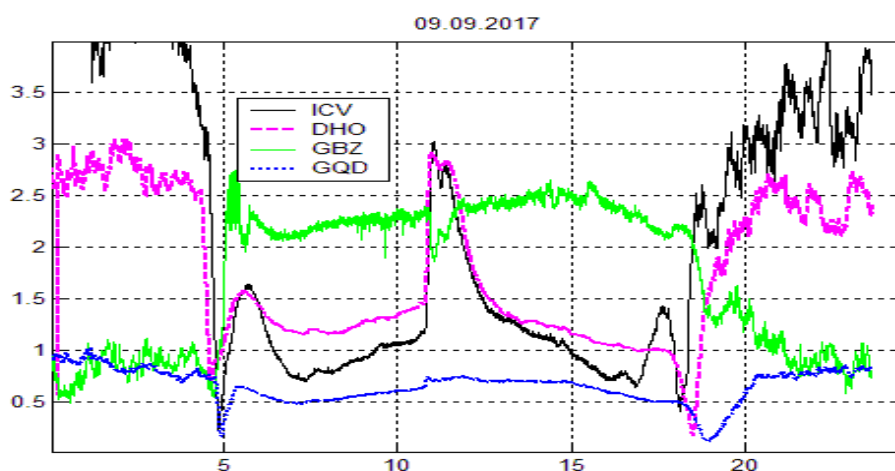


Рисунок 2.1 — Амплітуди ОНЧ радіосигналів 9 вересня 2017 р. на 4-х трасах: ICV-A118, DHO-A118, GBZ-A118, GQD-A118. За даними сайту:

<https://sidstation.loudet.org/data>

2.2 Флуктуації амплітуд ДНЧ радіосигналів при зміні висоти відбиття

Для наближених розрахунків амплітуду в пункті прийому на відносно коротких трасах (<1500 км) будемо розглядати як інтерференцію приземної хвилі з амплітудою A_g та двох іоносферних хвиль з амплітудами A_1 і A_2 , які відбилися від іоносфери 1 і 2 рази. В такому наближенні амплітуда сигналу визначається сумою векторів $\vec{A}_1, \vec{A}_2, \vec{A}_g$:

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + A_g^2 + 2A_1A_g \cos \Delta\varphi_{1g} + 2A_2A_g \cos \Delta\varphi_{2g} + 2A_1A_2 \cos \Delta\varphi_{12}. \quad (2.1)$$

Результуюча амплітуда залежить від A_1, A_2, A_g та зсувів фаз, що набігають внаслідок різної довжини шляху: $\Delta\varphi_{1g}$ і $\Delta\varphi_{2g}$ — зсуви фаз між 1 і 2 рази відбитими від іоносфери хвилями та приземною хвилею, $\Delta\varphi_{12}$ — зсув фаз між 1-ю і 2-ю іоносферними хвилями.

З геометричних міркувань з врахуванням сферичності Землі отримаємо вираз для довжини шляху n -кратно відбитої від іоносфери хвилі в залежності від висоти відбиття: $s_n = 2n[h^2 + 4a(h+a)\sin^2(\theta/4n)]^{1/2}$, де a — радіус Землі, h — ефективна висота відбиття, $\theta = d/a$, d — відстань між передатчиком та приймачем. Для 1-ї та 2-ї іоносферних хвиль довжини шляху складають:

$$s_1 = 2[h^2 + 4a(h+a)\sin^2(\theta/4)]^{1/2}, \quad s_2 = 4[h^2 + 4a(h+a)\sin^2(\theta/8)]^{1/2}. \quad (2.2)$$

Зсуви фаз можна розрахувати за формулами: $\Delta\varphi_{1g} = (2\pi/\lambda)(s_1 - d)$, $\Delta\varphi_{2g} = (2\pi/\lambda)(s_2 - d)$, $\Delta\varphi_{12} = (2\pi/\lambda)(s_2 - s_1)$. При отриманні виразу (2.2) припускалось, що висота відбиття h однакова по всій довжині траси.

Внаслідок значних втрат енергії ДНЧ радіосигналів під час кожного відбиття від іоносфери та від земної поверхні [2], основний вклад в результуючу амплітуду дає інтерференція 1-ї іоносферної та приземної хвиль. Графіки функцій $f(h) = \cos \Delta \varphi_{1g}$ для 4-х вказаних вище трас показано на рис. 2.2. За допомогою цих графіків можна зрозуміти причини різного відгуку на спалах на різних трасах. Ефективний рівень відбиття ДНЧ радіосигналів вдень зазвичай становить $h \approx 70 - 74 \text{ km}$. Після рентгенівського сонячного спалаху h знижується на декілька км, в залежності від потужності спалаху [4]. З лівої колонки рис. 2.2 видно, що при зменшенні h на трасах ICV-A118, DHO-A118, GQD-A118 реєструється позитивний відгук (збільшення амплітуди сигналу), а на трасі GBZ-A118 – негативний відгук (зменшення амплітуди).

де $\eta = A_1 / A_g$.

Доцільно розглядати відносні флуктуації амплітуд ДНЧ радіохвиль $\Delta A / \bar{A}$, де \bar{A} — усереднене незбурене значення амплітуди, а ΔA – збурення. Такий розгляд дозволяє виключити ряд факторів, як технічного характеру, так і фізичної природи, без врахування яких аналіз абсолютних величин ΔA є неможливим. Наприклад, різні калібрування антени і приймача, зміну висотного рівня відбиття ДНЧ хвиль від іоносфери впродовж доби та інших можливих чинників, в т.ч. нерегулярного характеру, які не завжди можна врахувати з достатньою точністю.

Оцінимо, як зміниться амплітуда прийнятого сигналу при зміні ефективної висоти відбиття на величину Δh . З виразу (2.2) отримаємо $2A\Delta A = 2A_1\Delta A_1 + 2A_2\Delta A_2 + 2A_1A_2\Delta f_{12} + 2A_1A_g\Delta f_{1g} + 2A_2A_g\Delta f_{2g}$, де $f_{12} = \cos \Delta \varphi_{12}$, $\Delta f_{12} = f'_{12}(h)\Delta h$, $f_{1g} = \cos \Delta \varphi_{1g}$, $\Delta f_{1g} = f'_{1g}(h)\Delta h$, $f_{2g} = \cos \Delta \varphi_{2g}$, $\Delta f_{2g} = f'_{2g}(h)\Delta h$. При цьому ми знехтували зміною ΔA_1 і ΔA_2 , залишивши тільки доданки, пропорційні квадрату амплітуд. Амплітуду сигналу представимо у вигляді $A = \bar{A} + \Delta A$. Тоді відносні флуктуації амплітуди ДНЧ хвилі:

$$\frac{\Delta A}{\bar{A}} = \frac{\Delta A}{A - \Delta A} = \frac{1}{F - 1}, \quad (2.3)$$

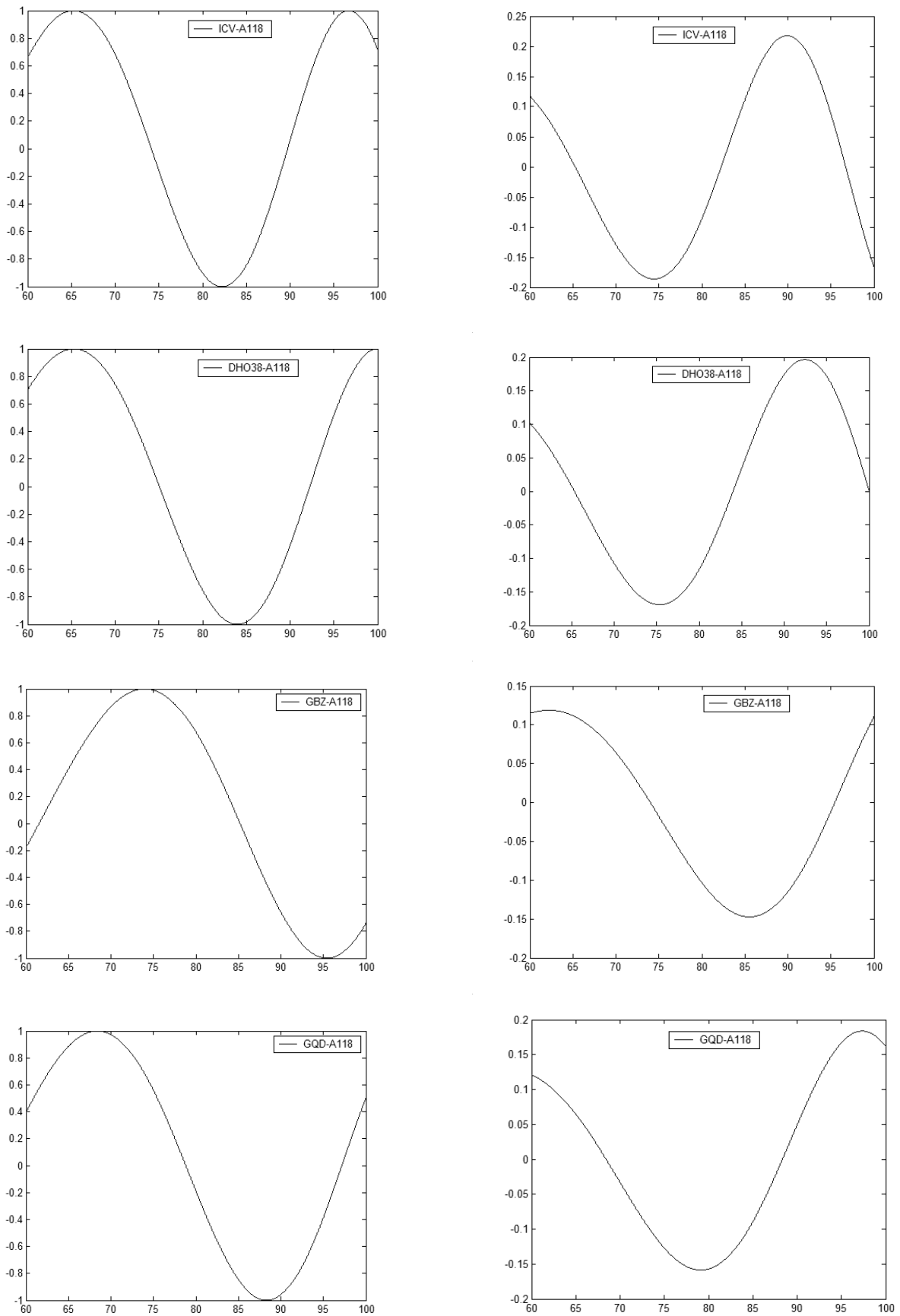


Рисунок 2.2 — Інтерференційні картини для 4-х трас: ICV-A118, DHO38-A118,

GBZ-A118, GQD-A118 (згори до низу). Зліва $-f'_{1g}(h) = \cos \Delta\varphi_{1g}$, справа $-f'_{1g}(h)$.

$$\text{де } F = \frac{A_1^2 + A_2^2 + A_g^2 + 2A_1A_2f_{12} + 2A_1A_gf_{1g} + 2A_2A_gf_{2g}}{A_1A_2\Delta f_{12} + A_1A_g\Delta f_{1g} + A_2A_g\Delta f_{2g}}.$$

Для малих змін амплітуд, знехтувавши одиницею в знаменнику (2.3), отримаємо:

$$\frac{\Delta A}{\bar{A}} \approx \frac{A_1A_2f'_{12}(z) + A_1A_gf'_{1g}(z) + A_2A_gf'_{2g}(z)}{A_1^2 + A_2^2 + A_g^2 + 2A_1A_2f_{12} + 2A_1A_gf_{1g} + 2A_2A_gf_{2g}} \Delta h = K\Delta h. \quad (2.4)$$

Тобто в розглянутому наближенні $\Delta A / \bar{A} \sim \Delta h$, при цьому коефіцієнт пропорційності $K(f_{12}, f_{1g}, f_{2g}, A_1, A_2, A_g)$ залежить від довжини траси і частоти сигналу. Цей результат неважко узагальнити на випадок довільної кількості відбитих хвиль.

Вирази (2.3), (2.4) справедливі, якщо висота відбиття зміщується на однакову величину Δh на всій протяжності траси, як це відбувається, наприклад, після рентгенівського спалаху. Проте іоносферні збурення, в переважній більшості випадків, носять локальний характер, а Δh змінюється вздовж траси випадковим чином. Наприклад, для іоносферних збурень викликаних поширенням АГХ Δh вздовж траси залежить від довжини хвилі, протяжності цугу, напрямку руху хвильового фронту та ін. Через втрати енергії при кожному відбитті, амплітуда 2-ї іоносферної хвилі в кілька разів менша від амплітуди 1-ї іоносферної хвилі. Крім того, з простих геометричних міркувань зрозуміло, що за наявності значних флуктуацій Δh уздовж траси, ймовірність попадання на приймач хвиль, відбитих від іоносфери більше одного разу, зменшується. Оскільки кут падіння дорівнює куту відбиття, для того щоб хвиля після другого відбиття від іоносфери потрапила на приймач, зміни Δh в обох точках відбиття повинні бути узгодженими, що не виконується при випадкових флуктуаціях. Тому збільшення хвильової активності в іоносфері, що супроводжується значними локальними змінами Δh уздовж траси, призводить до зменшення вкладу 2-ї іоносферної хвилі і, з тієї ж причини,

іоносферних хвиль вищих порядків, в результуючу амплітуду сигналу.

Для локалізації збурення вздовж траси припустимо, що основний внесок в результуючу амплітуду дають збурення Δh , які виникають в точці відбиття 1-ої іоносферної хвилі, тобто посередині між приймачем і передавачем. В такому наближенні:

$$\frac{\Delta A}{\bar{A}} \approx \frac{A_1 A_g f'_{1g}(z)}{A_1^2 + A_g^2 + 2A_1 A_g f_{1g}} \Delta h = \frac{f'_{1g}}{\eta + 1/\eta + 2f_{1g}} \Delta h = K(f_{1g}, \eta) \Delta h, \quad (2.5)$$

Для чисельних оцінок використаємо результати роботи [6]. Як видно з рис. 3б [6], для радіосигналу з частотою 20 кГц на трасах довжиною 700–1000 км амплітуди $A_1 \cong A_g$, на довших трасах $A_1 > A_g$. Для частоти 20 кГц оцінимо відношення $\eta = A_1 / A_g$ для трас: ICV-A118 ($d = 764 \text{ km}$), DHO-A118 ($d = 1163 \text{ km}$), GBZ-A118 ($d = 1305 \text{ km}$), GQD-A118 ($d = 1279 \text{ km}$). Для DHO-A118, GBZ-A118 і GQD-A118 отримаємо $\eta \cong 2.5$, для ICV-A118 – $\eta \cong 2$. Тобто величина $\eta + 1/\eta$, яка фігурує в знаменнику виразу $K(f_{1g}, \eta)$, змінюється на розглянутих трасах у відносно невеликих межах 2.5–2.9.

Залежності $K(f_{1g}, \eta)$ від ефективної висоти відбиття для розглянутих 4-х трас наведено на рис. 2.3. Фактично показано $\Delta A / \bar{A}$ в залежності від h для зміщення $\Delta h = 1 \text{ km}$. На всіх розглянутих трасах відгук в амплітуді сигналу на зміну Δh в денних умовах ($h = 70 - 74 \text{ km}$) є значно меншим по амплітуді, ніж вночі ($h > 85 \text{ km}$). Крім того, денні флуктуації амплітуд є малочутливими до відношення A_1 / A_g , в той час як нічний відгук істотно залежить від нього.

За допомогою залежності $K(h)$ на рис. 2.3 легко зрозуміти характер відгуку на спалах в амплітудах сигналів на різних трасах. Після сонячного спалаху рівень відбиття знижується ($\Delta h < 0$). На трасах ICV-A118, DHO38-A118, GQD-A118 величина $K < 0$ при денному рівні відбиття ($h = 70 - 74 \text{ km}$), тому $\Delta A > 0$ і амплітуда сигналу зростає. Для траси GQD-A118 зміна амплітуди сигналу у відповідь на спалах проявляється дуже слабо, оскільки значення K мале. Для траси GBZ-A118

денні значення $K > 0$, тому $\Delta A < 0$.

Мінімум результуючої амплітуди досягається при $f_{1g}(h) = -1$. Як видно з рис. 2.2, для траси ICV-A118 це відбувається при висоті відбиття сигналу $h \approx 82\text{km}$, для DHO38-A118 при $h \approx 84\text{km}$, GBZ-A118 $h \approx 95\text{km}$, GQD-A118 $h \approx 88\text{km}$. Вранці зі збільшенням UT висота відбиття зменшується, а ввечері, навпаки, зростає. Як видно з рис. 2.1, мінімуми амплітуд на вечірньому термінаторі з'являються на різних трасах в залежності від UT в наступній послідовності: ICV-A118, DHO38-A118, GQD-A118, а вранці – в зворотному порядку. На трасі GBZ-A118 мінімум на термінаторі не проявляється взагалі, оскільки нічний рівень відбиття нижче, ніж $h \approx 95\text{km}$.

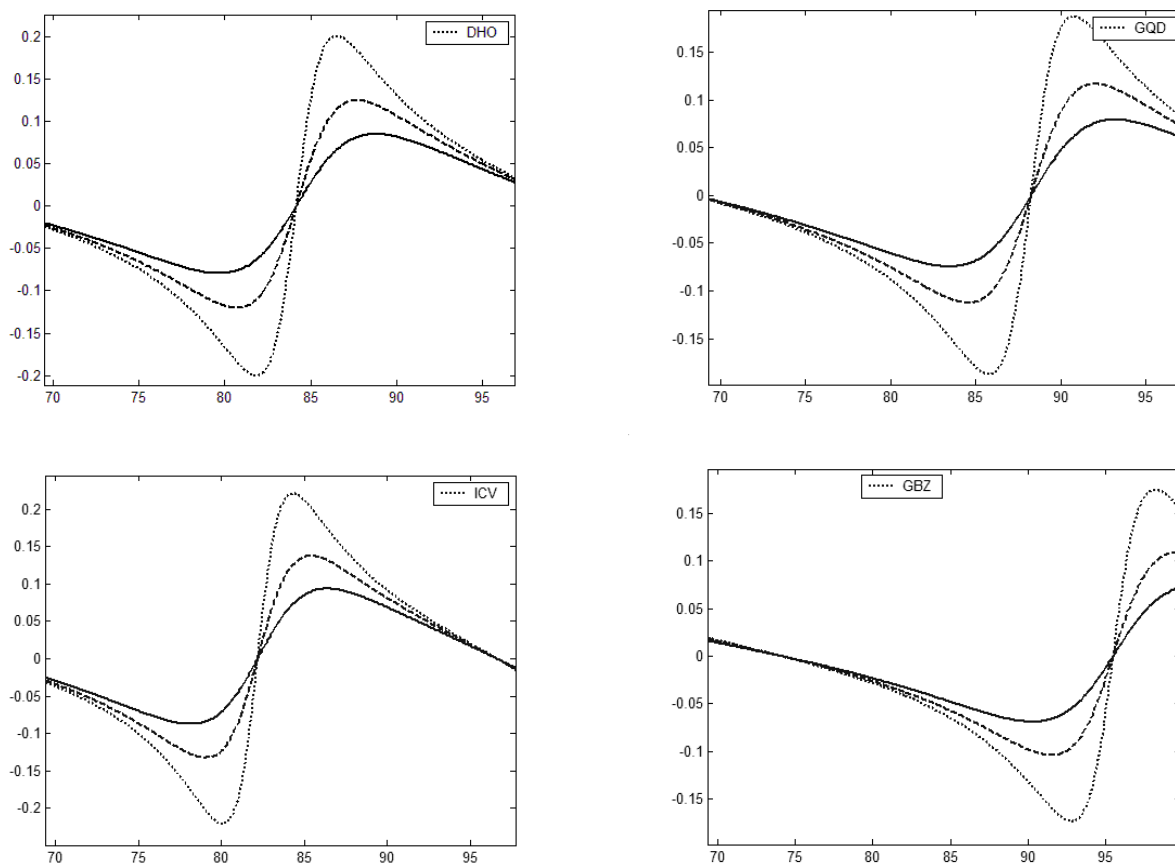


Рисунок 2.3 — Коефіцієнт пропорційності (км^{-1}) між $\Delta A/\bar{A}$ і зміщенням ефективної висоти відбиття Δh ДНЧ радіохвиль при трьох значеннях параметра $\eta + 1/\eta = 2.2$ (пунктирна), 2.5 (штрихована), 3 (суцільна крива).

2.3 Результати спостережень флуктуацій амплітуд

З експериментальних даних слідує, що вдень флуктуації амплітуд сигналів майже на порядок менші, ніж вночі (рис. 2.4). Співвідношення між $(\Delta A / \bar{A})_{day}$ і $(\Delta A / \bar{A})_{night}$ в першу чергу визначається величиною $K(f, f', \eta)$ та її залежністю від ефективної висоти відбиття ДНЧ сигналів. Як це видно з рис. 2.3, на розглянутих трасах відгук в амплітуді сигналу виявляється значно більшим вночі, ніж вдень, в першу чергу, не з фізичних причин, а внаслідок більших значень $K(f, f', \eta)$. Вночі інтерференційна картина є нестабільною і будь-яка незначна зміна Δh чи відношення A_s / A_g спричинює відчутні зміни в амплітуді прийнятого сигналу.

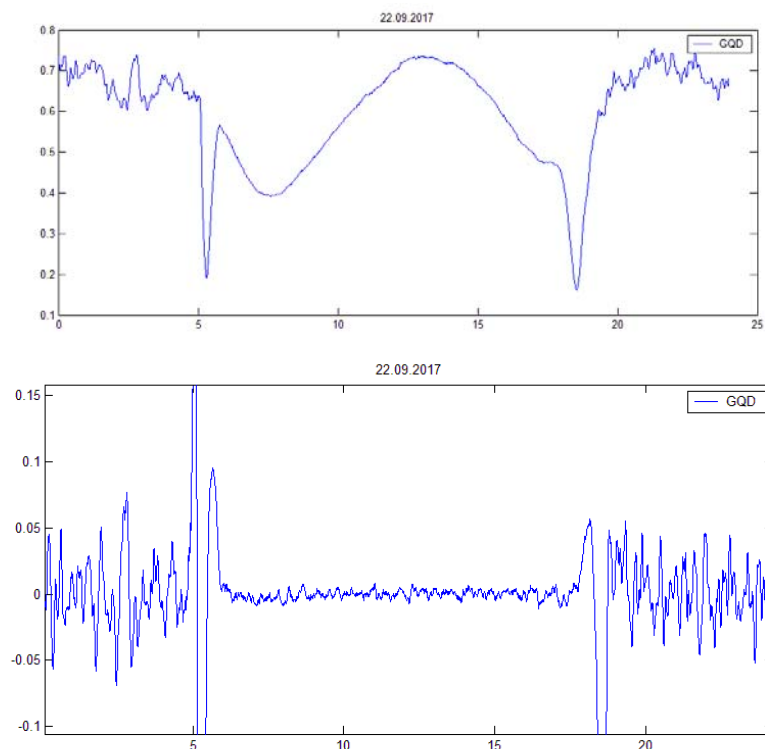


Рисунок 2.4 — Добовий хід амплітуди ДНЧ сигналу на трасі GQD-A118: вгорі – вихідні дані; внизу – $\Delta A / \bar{A}$. Дані сайту: <https://sidstation.loudet.org/data>.

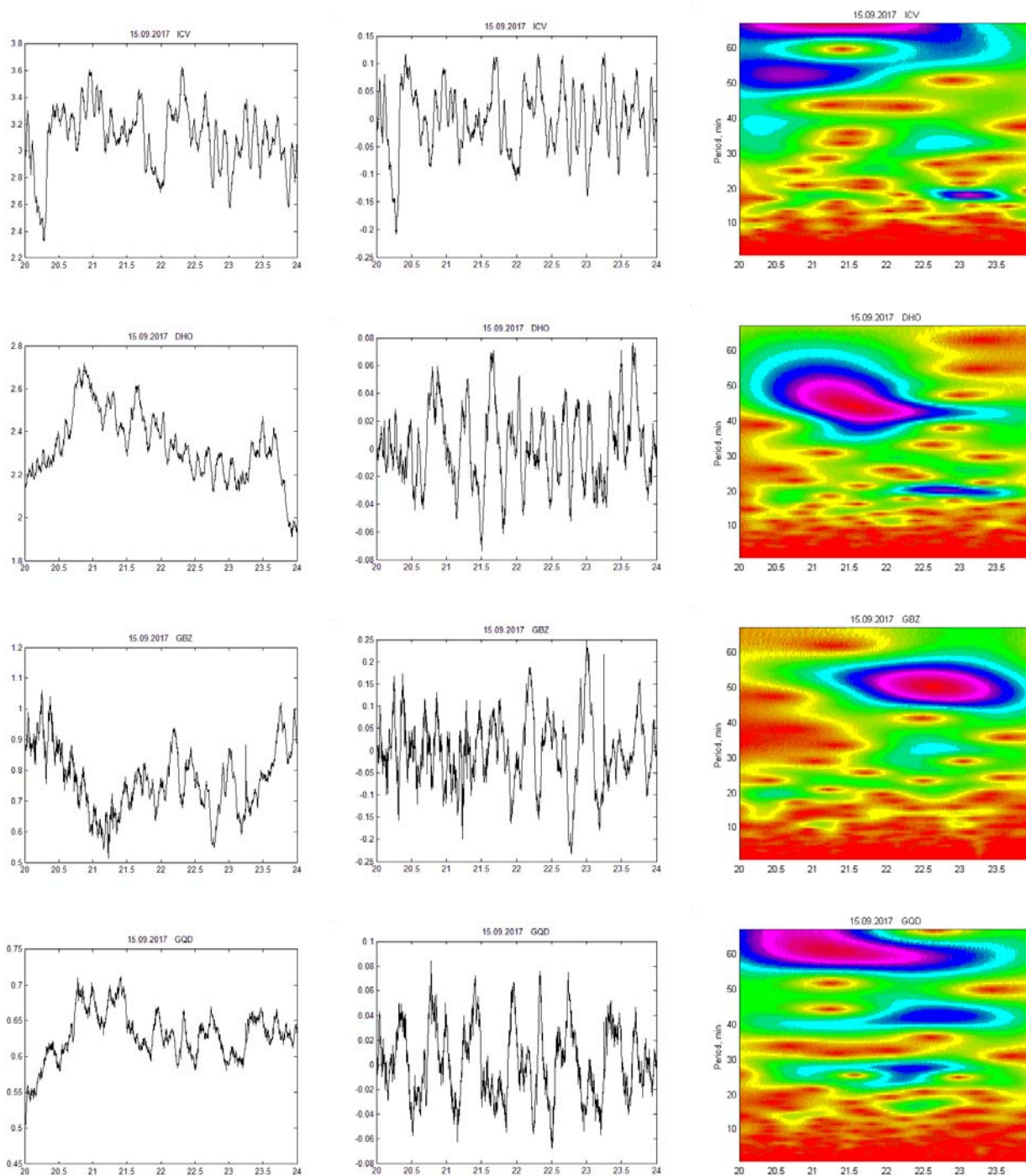


Рисунок 2.5 — Флуктуації амплітуд ДНЧ радіохвиль у вечірні години на 4-х трасах ICV-A118, DHO-A118, GBZ-A118, GQD-A118 (знизу вгору). Зліва направо для кожної траси представлено: амплітуду (у вольтах), відносні варіації $\Delta A / \bar{A}$ та амплітудні вейвлет-спектри. Дані завантажено з сайту: <https://sidstation.loudet.org/data>.

Проведено аналіз флуктуацій $\Delta A / \bar{A}$ на різних трасах у вечірні та нічні години. Результати обробки даних увечері 15.09.2017 для трас ICV-A118, DHO-A118, GBZ-A118 та GQD-A118 показано на рис. 2.5. Зліва направо: 1) значення амплітуди (у вольтах); 2) $\Delta A / \bar{A}$; 3) амплітудні вейвлет-спектри. Як видно, спектральний аналіз нічних амплітуд ДНЧ сигналів на різних трасах показує наявність періодичних флуктуацій в діапазоні від 4–5 хвилин до ~1 год., що добре узгоджується з характерними періодами АГХ/РІЗ в атмосфері (рис. 2.5).

Досліджено амплітуди ДНЧ сигналів на трасах DHO-A118 та GQD-A118 у різні сезони впродовж 2013-2014 рр. Усереднені за вечірні години (UT=20–24^h) флуктуації амплітуд показано на рис. 2.6. Відносні флуктуації на трасі DHO-A118 складають 2–6%, з середнім значенням ~3.5%. Досить чітко виражено мінімальний рівень коливань ~2%. На трасі GQD-A118 середній рівень коливань амплітуд дещо нижчий (~3%), а мінімальний <2%. Флуктуації амплітуд з періодами АГХ/РІЗ наявні у різні сезони, з тенденцією до збільшення амплітуд у літні місяці на обох трасах. Спостережуване переважання літніх значень $\Delta A / \bar{A}$ пов'язане з тим, що влітку ефективний рівень h є систематично вищим, ніж зимою. За рахунок цього величина $K(f, f', \eta)$ і, відповідно, спостережувані значення $\Delta A / \bar{A}$ будуть теж більшими (див. рис. 2.3).

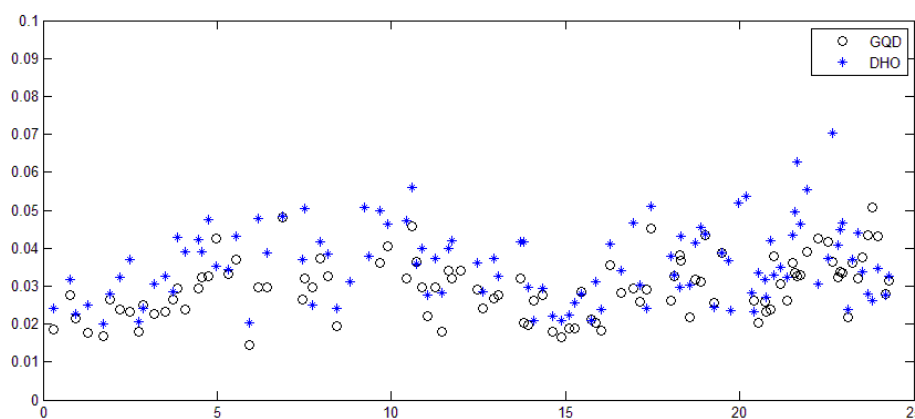


Рисунок 2.6 — Середні відносні варіації амплітуд сигналу $\Delta A / \bar{A}$ у вечірні години

(UT=20–24h) на трасах DHO-A118 і GQD-A118 впродовж 2013-2014 рр. По горизонтальній осі вказано порядковий номер місяця, починаючи з 2013 р.

На основі отриманих результатів оцінимо зміни ефективної висоти відбиття радіохвиль, викликані поширенням АГХ. Як видно зі спостережень, значення $\Delta A / \bar{A}$ на трасі DHO-A118 дещо перевищують флуктуації на трасі GQD-A118. Для траси GQD-A118 $\eta + 1/\eta \cong 2.9$, тоді згідно з рис. 2.3 спостережувані флуктуації амплітуд $\Delta A / \bar{A} = 0.02 - 0.04$ відповідають вертикальному зміщенню висоти відбиття ДНЧ хвиль на $\Delta h = 0.3 - 0.4$ км. Для траси DHO-A118 $\eta + 1/\eta \cong 2.5$ і $\Delta A / \bar{A} = 0.025 - 0.05$, що відповідає $\Delta h = 0.25 - 0.5$ км. Розбіжність у Δh може бути пов'язана з неточним визначенням $\eta + 1/\eta$.

2.4 Зв'язок флуктуацій амплітуд ДНЧ радіохвиль з концентрацією електронів в іоносфері

Висотний профіль електронної концентрації в інтервалі висот 50-90 км можна представити у вигляді експоненційної залежності [5]:

$$N_e(z) = 1.43 \times 10^{13} \exp(-0.15h) \exp[(\beta - 0.15)(z - h)]. \quad (2.6)$$

Тут $h(km)$ — ефективний висотний рівень відбиття ДНЧ хвиль, а параметр $\beta(km^{-1})$ можна визначити за емпіричними формулами [5]:

$$\begin{aligned} h &= 74.37 - 8.087 \cos \chi + 5.779 \cos \Theta - 1.213 \cos \alpha - 0.0044 X_4 - 6.035 X_5, \\ \beta &= 0.5349 - 0.1658 \cos \chi - 0.08584 \cos \Theta + 0.1296 X_5, \end{aligned} \quad (2.7)$$

де χ — зенітний кут Сонця,

Θ — географічна широта,

$$\alpha = 2\pi(m - 0.5)/12,$$

m — порядковий номер місяця року,

X_4 — кількість сонячних плям,

$X_5 = 0$ та 1 для спокійного і збуреного рівня геомагнітної активності, відповідно.

Відбиття ДНЧ радіосигналів від іоносфери безпосередньо залежить від градієнту висотного розподілу електронів. Як слідує з (2.6), відносні флуктуації електронної концентрації на фіксованому висотному рівні пов'язані з Δh співвідношенням:

$$\frac{\Delta N_e}{N_e} = -\beta \Delta h. \quad (2.8)$$

Згідно з (2.7) вночі параметр $\beta \sim 0.5$, а вдень $\beta \sim 0.3$. Тому зміна ефективної висоти відбиття на величину Δh відповідає майже вдвічі більшим відносним флуктуаціям електронної концентрації вночі, ніж вдень.

З урахуванням (2.4) з (2.8) отримаємо:

$$\frac{\Delta A}{\bar{A}} = -\frac{K}{\beta} \frac{\Delta N_e}{N_e}. \quad (2.9)$$

Звідси слідує, що спостережувані флуктуації амплітуд радіохвиль пропорційні варіаціям електронної концентрації на висоті відбиття. Коефіцієнт пропорційності залежить від висотного градієнту електронної концентрації, що задається параметром β та від величини K , яка визначає характер інтерференції 1-ї іоносферної та приземної хвиль. З (2.9) видно, що при однакових $\Delta N_e / N_e$ в іоносфері, вдень і вночі буде спостерігатися різний відгук у $\Delta A / \bar{A}$.

Періодичні зміни різних параметрів 04.08.2017 на трасі GQD-A118 показано на рис. 2.7. Для цієї дати вночі $\chi \approx 114^\circ$, вдень $\chi \approx 34^\circ$. Тоді згідно (2.6) і (2.7) вночі $h = 82.6 \text{ km}$, $\beta = 0.54 \text{ km}^{-1}$, а вдень $h = 72.6 \text{ km}$, $\beta = 0.34 \text{ km}^{-1}$. Для цих значень

параметрів на рис 2.7 показано згори вниз: $\Delta A/\bar{A}$, Δh і $\Delta N_e/N_e$ в залежності від UT. В середньому вдень: $\Delta A/\bar{A} \sim 0.4\text{--}0.5\%$, $\Delta h \sim 0.2\text{--}0.3$ км, $\Delta N_e/N_e \sim 10\%$, вночі: $\Delta A/\bar{A} \sim 2\text{--}3\%$, $\Delta h \sim 0.3\text{--}0.4$ км, $\Delta N_e/N_e \sim 20\%$.

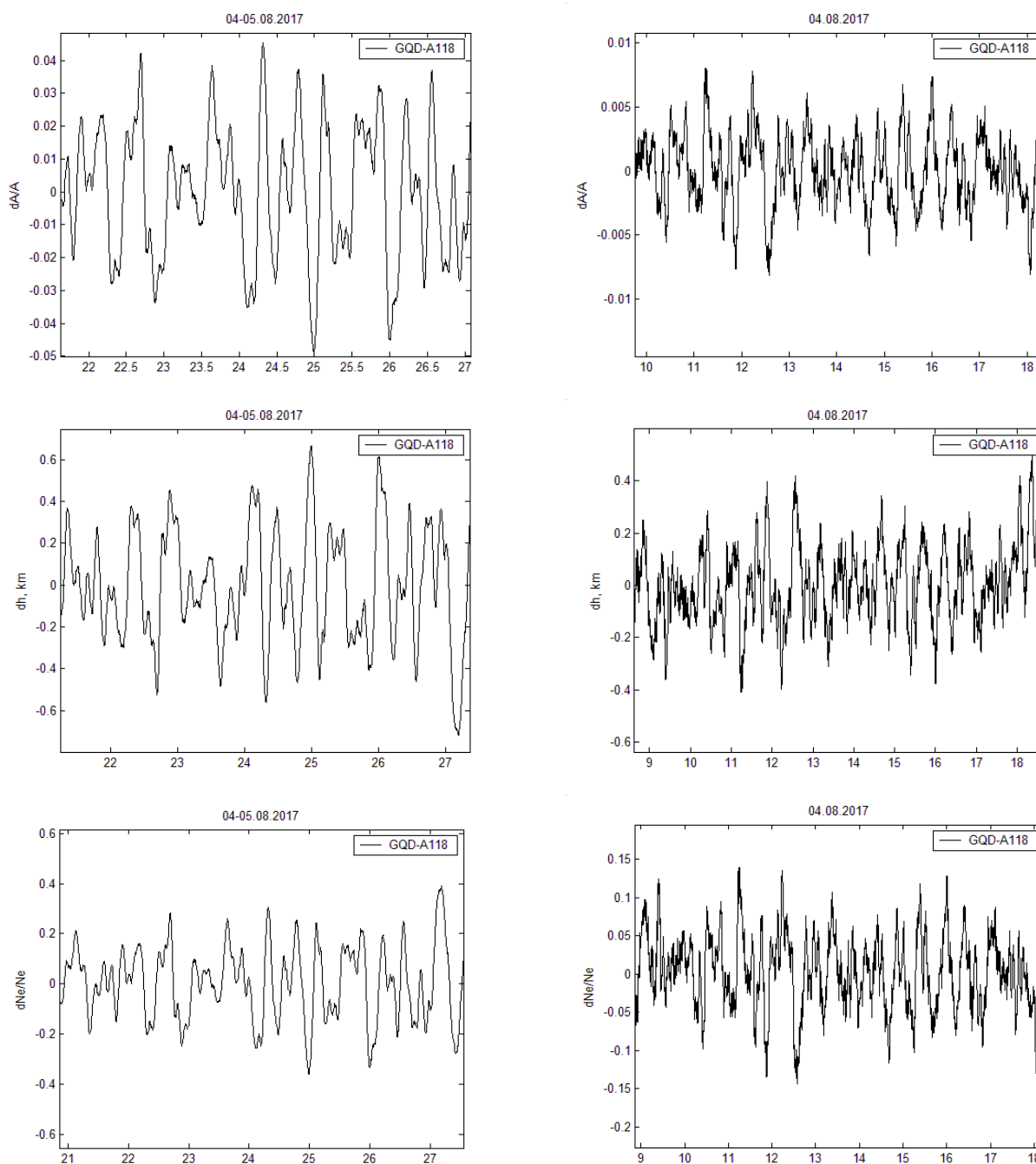


Рисунок 2.7 — Флуктуації амплітуд сигналів $\Delta A/\bar{A}$, зміщення ефективного рівня відбиття Δh (км) та концентрація електронів $\Delta N_e/N_e$ на трасі GQD-A118 впродовж 4-5 серпня 2017 року. Ліва колонка — ніч, права колонка — день.

В таблиці 2.1 узагальнено середні значення флуктуацій різних параметрів на трьох трасах впродовж 04–06.08.2017. Як видно, середні флуктуації іоносферних параметрів (фоновий рівень коливань) за однакових умов є близькими за величиною, що є цілком очікуваним результатом на відносно коротких трасах.

Таблиця 2.1. Середні флуктуації амплітуд ДНЧ радіосигналів та іоносферних параметрів на різних трасах впродовж 04–06.08.2017.

траса	ніч			день		
	$\Delta A / \bar{A}$, %	Δh , км	$\Delta N_e / N_e$, %	$\Delta A / \bar{A}$, %	Δh , км	$\Delta N_e / N_e$, %
GQD-A118	3–4	0.3–0.4	20–25	0.4–0.5	0.2–0.3	7–10
ICV-A118	5–7	0.2–0.3	12–15	1–2	0.2–0.4	5–9
DHO-A118	2–4	0.4–0.5	15–25	0.5–1	0.15–0.3	5–7

На різних трасах відносні флуктуації $(\Delta A / \bar{A})_{night}$ в кілька разів перевищують $(\Delta A / \bar{A})_{day}$. На трасі GQD-A118 нічні флуктуації перевищують денні на порядок. Значення $\Delta N_e / N_e$ в нічних умовах в 2–3 рази перевищують фонові денні значення. Проте Δh виявляються близькими по величині не тільки на різних трасах, а і в різних умовах день/ніч. Періодичні зміни зміщення висоти відбиття на різних трасах і за різних умов в середньому належать інтервалу $\Delta h \approx 0.2 - 0.4 \text{ km}$.

2.5 Висновки до розділу 2

Проаналізовано можливість визначення властивостей хвильових збурень в іоносфері за даними вимірювань амплітуд ДНЧ радіосигналів. Досліджено зв'язок флуктуацій $\Delta A / \bar{A}$ ДНЧ радіосигналів з параметрами іоносфери на рівні відбиття радіохвиль на кількох європейських трасах.

Досліджено спектральний склад та фоновий рівень флуктуацій амплітуд ДНЧ хвиль в різні сезони впродовж 2013–2014 рр. Проаналізовано особливості флуктуацій амплітуд в денних та нічних умовах. Вночі $\Delta A / \bar{A}$ в 5–10 разів (в

залежності від траси) перевищують відповідні денні значення. За даними вимірювань $\Delta A / \bar{A}$ обчислено відносні варіації електронної концентрації $\Delta N_e / N_e$ на висотному рівні відбиття радіохвиль. В середньому, вночі на висоті ~ 85 км $\Delta N_e / N_e \sim 20\%$, вдень на висоті ~ 70 км $\Delta N_e / N_e \sim 5-10\%$.

Виявлено цікавий ефект — зміщення рівня відбиття радіохвиль Δh в денних і нічних умовах та на різних трасах в середньому складає кілька сотень метрів. Можна припустити, що таке значення Δh відповідає зміщенню об'єму нейтрального газу при поширенні АГХ в мезосфері.

ВИСНОВКИ

Роботу виконано в повному обсязі у відповідності до технічного завдання на виконання НДР.

У звітний період:

допрацьовано методику прогнозування локальних геомагнітних збурень;

проведено валідацію методики прогнозування локальних геомагнітних збурень на основі міжнародних даних;

проведено попередній аналіз можливості діагностики іоносферних збурень за даними вимірювань ДНЧ-радіохвиль;

досліджено сезонні залежності завад проходженню ДНЧ-радіосигналів.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

До розділу 1

1. Парновський, О. Прогнозування локальних геомагнітних збурень на території України [Текст] // Звіт про НДР. — Київ, 2015. — 14 с.
2. Parnowski, A. S. Regression modelling of geomagnetic activity [Text] / A. S. Parnowski // Journal of Physical Studies. — 2011. — Vol. 15, № 2. — P. 1–8 (2002). — ISSN 2310-0052 (Online), ISSN 1027-4642 (Print).
3. Press, W.H. Numerical Recipes in FORTRAN. The Art of Scientific Computing [Text] / W.H. Press, S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling, B.P. Flannery // 2nd Ed. — Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1992.
4. Vlasov, D.I. Another approach to predicting geomagnetic activity [Text] / D.I. Vlasov, A.S. Parnowski // Adv. Astron. & Space Phys. — submitted.
5. <http://www.cawcr.gov.au/projects/verification/> [Електронний ресурс]

До розділу 2

1. Wait J.R. and Spies K.P. Characteristics of the Earth-ionosphere waveguide for VLF radio waves // Technical Note 300, Issued December 30, 1964.
2. Ferguson, J. A., and F. P. Snyder, 1980, Approximate VLF/LF mode conversion model, Technical Document, 400, Naval Ocean Systems Center, San Diego, California, USA.
3. Ferguson, J.A., 1998, Computer Programs for Assessment of Long-Wavelength Radio Communications. Space and Naval Warfare Systems Center, San Diego, CA (Version 2.0).
4. Grubor, .D, Sulic, D., Zigman, V. 2005. Influence of splar X-ray flares on the earth ionosphere wave guide. Serb. Astron. 171, 29-35.
5. Thomson, N. R. 1993. Atmos. Sol.-Terr. Phys., 55(2), 173.

6. Yoshida, Y., Yamauchi, T., Horie, T., Hayakawa, M., 2008, On the generation mechanism of terminator times in subionospheric VLF/ELF propagation and its possible application to seismogenic effects, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 8, 129–134.

Публікація результатів даного проекту неможлива відповідно до умов п.п. 4.2 та 4.4 Договору на виконання наукового проекту, оскільки вони дозволяють передавати права на використання ОІВ, створених в ході виконання проекту, зокрема права, необхідні для оприлюднення результатів роботи, лише за умови, якщо така передача призводить до отримання доходу установою-виконавцем.