

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Харківський національний університет  
імені В. Н. Каразіна  
Факультет радіофізики, біомедичної  
електроніки та комп'ютерних систем  
Кафедра космічної радіофізики

**Пояснювальна записка**  
до дипломної роботи  
магістра

на тему: **ДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ В ІОНОСФЕРІ. РЕЗУЛЬТАТИ  
ВЕРТИКАЛЬНОГО ДОПЛЕРІВСЬКОГО ЗОНДУВАННЯ**

Виконала: студентка 6 курсу, групи РР-66  
Спеціальності 105 Прикладна фізика та наноматеріали  
Освітньо-професійна програма «Радіофізика та електроніка»

Воронкіна В. О.

Керівник  
доктор фіз.-мат. наук,  
професор

Чорногор Л. Ф.

Рецензент  
доктор фіз.-мат. наук,  
професор

Лазоренко О. В.

Харків 2019

УДК: 550.388.2; 551.510.535

### **Реферат**

В. О. Воронкіна. Динамічні процеси в іоносфері. Результати вертикального доплерівського зондування. Харків, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, факультет радіофізики, біомедичної електроніки та комп'ютерних систем, кафедра космічної радіофізики, 2019, 21 рис., 2 таб., 46 сторінок, 77 посилань.

Сформульовано теоретичні основи методу доплерівського радіозондування іоносферної плазми, коротко описані методики вимірювань, вимірювальна установка та обробка даних.

Оброблено та описано варіації доплерівських спектрів, котрі супроводжують проходження сонячного термінатора, старту ракет з різних космодромів Росії, США, Китаю, Індії та Франції.

УДК: 550.388.2; 551.510.535

### **Реферат**

В. О. Воронкина. Динамические процессы в ионосфере. Результаты вертикального доплеровского зондирования. Харьков, Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, факультет радиофизики, биомедицинской электроники и компьютерных систем, кафедра космической радиофизики, 2019, 21 рис., 2 таб., 46 стр., 77 библиографических ссылок.

Сформулированы теоретические основы доплеровского радиозондирования ионосферной плазмы, кратко описаны методики измерений измерительная установка и результаты обработки данных.

Обработаны и описаны вариации доплеровских спектров, которые сопровождалось прохождением солнечного терминатора, старты ракет с различных космодромов России, США, Китая, Индии и Франции.

UDC: 550.388.2; 551.510.535

### **Abstract**

V. O. Voronkina. Dynamic processes in the ionosphere. Vertical Doppler Sounding Results. Department of Space Radio Physics, V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, 2019, 46 Pages, 21 Figures, 2 Table, 77 References.

The theoretical bases of Doppler technique of an ionosphere plasma are described, the measuring equipment's, measurement technique and processing of data are briefly described.

The variations of Doppler spectrum accompanying passing of the solar terminator, starts of rockets from Russia, USA, China, India and France cosmodromes are processed and interpreted.

## ЗМІСТ

1. ВСТУП.....	4
2. ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО МЕТОД ДОПЛЕРІВСЬКОГО РАДІОЗОНДУВАННЯ ІОНОСФЕРИ .....	5
2.1. Сутність методу доплерівського радіозондування .....	5
2.2. Загальні відомості про доплерівський радар ВЧ зондування ХНУ імені В. Н. Каразіна .....	7
2.3. Результати іоносферних досліджень методом Доплера .....	9
2.4. Висновки до розділу 2 .....	11
3. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ АНАЛІЗУ СИГНАЛІВ ДОПЛЕРІВСЬКОГО РАДІОЗОНДУВАННЯ .....	13
3.1. Загальні положення .....	13
3.2. Основи системного спектрального аналізу.....	13
3.3. Висновки до розділу 3 .....	14
4. ОПИС РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	15
4.1. Загальні положення .....	15
4.2. Ефекти в іоносфері, виявлені під час стартів ракет.....	15
4.3. Висновки до розділу 4 .....	19
5. ВИСНОВКИ.....	20
6. СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	21
7. ДОДАТОК.....	28

## 1. ВСТУП

Іоносфера, розглядаючи її як підсистему, входить в таку систему, котру називають: Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера – міжпланетне середовище – Сонце. Зверху та знизу до неї надходять енергії, деякі потоки речовини і випромінювання різноманітного характеру, як штучного, так і природного [1]. В ході таких дій в цілому і в середній іоносфері (висоти  $z \sim 100 - 300$  км) зокрема, виникають такі нестационарні процеси з характерними часом від одиниць секунд до 11 років і більше, деякі з них розглянуті в даній роботі.

На цей час актуальними стають проблеми взаємодії космічної погоди та областей навколоземного космічного простору. В рамках першої з яких ведуться дослідження різноманітних процесів як в природно-, так саме і в штучно-збурених умовах. Штучні джерела таких збурень опиняються зручними тому, що вдається дозувати масштаб енерговиділення, задавати його час та місце [2 - 4]. У такому випадку досить точно задається місце, час а також масштаб енерговиділення. Джерелами енерговиділення в таких активних експериментах можуть слугувати потужне випромінювання, хімічні та ядерні вибухи, інжекція частинок із плазми та тк. ін.

В представленій роботі в якості саме такого джерела використовуються старту досить потужних ракет, які в свою чергу мають місце із різних точок земної кулі і віддалених від місця спостереження (Радіофізичний обсерваторія ХНУ імені В. Н. Каразіна, поруч з м Харковом) на величину від 1500 до 10000 км. Оскільки саме реакції середовища на старту космічних апаратів маскуються збуреннями природного характеру, то виникає додаткова необхідність досліджувати цей фон на якому виявлена та спостерігається реакція на старту. Найбільш значним джерелом природних збурень є нестационарні процеси на Сонці та, як наслідок, магнітні бурі, а також проходження сонячного термінатора.

Метою даної роботи є формулювання та інтерпретація отриманих результатів експериментів із дослідження іоносферної плазми, збуреної джерелами природної а також антропогенної природи.

Робота складається з вступу, трьох розділів і висновку. У другому та третьому розділах цієї роботи викладено результати аналітичного а також статистичного огляду. У четвертому – викладені та описані результати експериментів, проведених в Радіофізичній обсерваторії ХНУ імені В. Н. Каразіна в 2018 - 2019 рр. Переважно увага зосереджувалась на пошуках ефектів в іоносфері, викликаних стартами потужних ракет та проходженнями сонячних термінаторів [5-10].

У висновку викладені основні результати досліджень.

## 2. ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО МЕТОД ДОПЛЕРІВСЬКОГО РАДІОЗОНДУВАННЯ ІОНОСФЕРИ

### 2.1. Сутність методу доплерівського радіозондування

Сам метод Доплерівського радіозондування базується на вимірюванні та аналізі зсуву частоти  $f_d$  відображених радіохвиль, які викликали нестационарні процеси в середній іоносфері ( $z = 100 - 300$  км) [12]. Доплерівський зсув частоти (ДЗЧ) може бути обумовлений: змінами властивостей середовища уздовж всієї траєкторії (зміна електронної концентрації), зміна геометричного шляху хвилі (насамперед, результат зсуву рівня відображення). Нижче  $z = 100$  км саме цей метод не чутливий до певних змін в середовищі, тобто саме через малу концентрацію електронів. Середовище в свою чергу практично не дає вкладу в ефект Доплера, так на цих висотах показник заломлення середовища мало чим відрізняється від одиниці. Зовнішню іоносферу не вдалося дослідити даним методом саме через відсутність відбитих сигналів.

При  $f < f_k$  ( $f_k$  – це критична частота іоносфери) відображені сигнали приймаються на приймач і обробляються в доплерівській приставці, де шляхом порівняння цих частот високостабільного випромінювання  $f_0$  і прийнятого  $f$  сигналів вдається виділити різницю цих частот [11-15].

$$f_d = f - f_0 \quad (2.1.1)$$

Зазвичай  $f_d \sim 0,01 - 1$  Гц за  $f \sim 1 - 10$  МГц.

Відомо, ДЗЧ  $\Delta f$  при розповсюдженні радіохвиль викликається зміною саме в часі фазового шляху  $P$  [14]:

$$\Delta f = -\frac{f}{c} \frac{dP}{dt}, \quad (2.1.2)$$

де  $c$  – швидкість світла в вакуумі.

У найліпшому випадку, тобто якщо не враховувати як впливає геомагнітне поле, кривизну іоносфери та зіткнення частинок в ній, із загального рівняння (2.1.1) можливо отримати рівняння для деяких окремих випадків.

Роздивимося випадок для вертикального розповсюдження при невеликих змінах електронної концентрації у не відбиваючій області ( $n \approx 1$ ) та швидкості її варіації  $\frac{\partial N}{\partial t}$ , залежної від компоненти  $z$ . Як нам відомо, варіації фазового шляху [15-16]

$$\Delta L = \int \Delta n ds, \quad (2.1.3)$$

Де літера  $n$  – це дійсна частка показника заломлення [17],

$$f_d = \frac{e^2}{\pi m c} \frac{1}{f} \int_0^{z_0} \frac{\partial N}{\partial t} dz = \frac{e^2}{\pi m c} \frac{1}{f} \frac{dN_T}{dt}, \quad (2.1.4)$$

де  $N_T = \int_0^{z_0} N(z,t) dz$  – кількість електронів в стовпі,  $e$  та  $m$  – заряд і маса електрона,  $z_0$  – висота відбиття хвилі. У цьому разі виявлені доплерівський зсув частоти являються оберненим, пропорційно робочій частоті.

Якщо такі варіації частоти зумовлені невеликими змінами висоти відбиття при незмінній формі шару, то  $f_d$  становиться пропорційне саме робочій частоті [18].

$$f_d = -2 \frac{f}{c} \frac{dz_0}{dt} = -\frac{f}{c} v, \quad (2.1.5)$$

Загалом в іоносфері одночасно відбуваються зміни двох типів, і залежність  $f_d$  від частоти  $f$  можливо матиме складний характер.

У методі доплерівського зондування загалом мінімальне значення доплерівського зсуву частоти  $f_{d \min} \approx 0.01-10$  Гц. Таке значення не є кінцевим. Точність вимірювання може бути обмежена похибкою, яка на тепер при деяких апроксимаціях, та використовуючи положення із статистичної теорії оцінки параметрів сигналу, отримала наступне співвідношення [19]:

$$\Delta f_{dp} = \sqrt{\frac{12}{q \cdot T_d^2}}, \quad (2.1.6)$$

де  $T_d$  – це інтервал часу, за якого відбувається спектральне оцінювання.

Потенційна чутливість методу доплерівського зондування виявлення ХЗ це [19-22]:

$$\delta_{N_p} = \frac{T}{2\pi} \frac{C}{L_N} \cdot \frac{\Delta f_{dp}}{f} = \frac{1}{\pi} \frac{\lambda}{L_N} \frac{T}{T_d} \sqrt{\frac{3}{q}}, \quad (2.1.7)$$

де  $L_N$  – довжина області висот, за якої надається основний внесок в доплерівський ефект;  $\lambda = c/f$ . Як при  $f = 3$  МГц,  $q \approx 10^6$ ,  $T_d = 51.2$  с,  $T = 10^3$  с та  $L_N = 30$  км значення  $\Delta f_{dp} \approx 6.8 \cdot 10^{-5}$  Гц, а  $\delta_{N \min} \approx 3.5 \cdot 10^{-3} \%$ .

При цьому повинна забезпечуватися короткочасна (в межах однієї хв), нестабільність частоти не менше як  $10^{-11}$ .

Насамперед, похибку  $\Delta f_{dp}$  не треба зводити до значень в декілька разів менших від значення роздільної здатності по частоті  $\delta f_d$ , властивою доплерівському оцінюванню, без застосування таких методів, що дозволяють отримати такий дозвіл, як  $\delta f_d = 1/T_d$ . Зауважимо, що похибка оцінки значення  $f_d$  становить приблизно  $\delta f_d / 2$ . При  $T_d = 51,2$  ми маємо  $\delta f_d = 2 \cdot 10^{-2}$  Гц. Для того щоб отримати  $\delta f_d \approx 10^{-4} - 10^{-5}$  Гц інтервал треба збільшити до  $10^4 - 10^5$  с відповідно. Треба зважити на те, що повинна виконуватися, нерівність  $T \gg T_d$  або,  $T \geq 2T_d$  (як наслідок теореми Котельникова). Саме тому за  $T \approx 600$  с маємо  $T_{d\min} \approx 300$  с,  $\delta f_d \approx 3 \cdot 10^{-3}$  Гц,  $\delta f_{d\min} \approx 1,5 \cdot 10^{-3}$  Гц та  $\delta N_{\min} \approx 0,05\%$  [20-24].

## **2.2. Загальні відомості про доплерівський радар ВЧ зондування ХНУ імені В. Н. Каразіна**

Експерименти проводились в самій Радіофізичній обсерваторії та на кафедрі космічної радіофізики в ХНУ імені В. Н. Каразіна. Обсерваторія базується в с. Гайдари, поруч з м. Харковом ( $49^\circ 38'$  півн. ш,  $36^\circ 20'$  сх. довг). Комплекс вертикального доплерівського ВЧ зондування, на даний момент, є одним з багатьох комплексів, котрі розміщені в РФО [25-27]. Комплекс використовується для досліджувань динаміки плазми в іоносфері в період як природних, так і штучних збурень.

В стаціонарному комплексі втілені принципи одночасних випромінювань, прийомів та обробки зондуючих сигналів на двох таких когерентних частотах.

### **Системи які входять до складу комплексу:**

- двухканальна передавальна система ( яка складається із передавачів, передавальних антен та генераторів частоти);
- двухканальна приймальна система (приймачі, які мають конструктивно високостабільні генератори);
- системи контролю управління та стробування передавально-приймальних трактів;
- системи обробки сигналів та їх реєстрації;
- система частотного високоопорного опорного еталонного генератора;
- суміжна система калібрування цього генератора.

### **Головні критерії доплерівського радару:**

- діапазон частоти 3 – 30 МГц;
- потужності сигналів в імпульсі  $\sim 1$  кВт;
- тривалості імпульсу сигналу 1 – 2 мс;
- коефіцієнт збільшення сигналу антени 1 – 10;
- співвідношення сигнал / шум;
- поляризація антени – лінійна;

- частота відтворення імпульсів 100 Гц;
- точність замірів близько 0,01 Гц;
- роздільна здатність за частотою 0,02 Гц.

Функціональна схема доплерівського ВЧ радара зобраєна на рис.2.1.

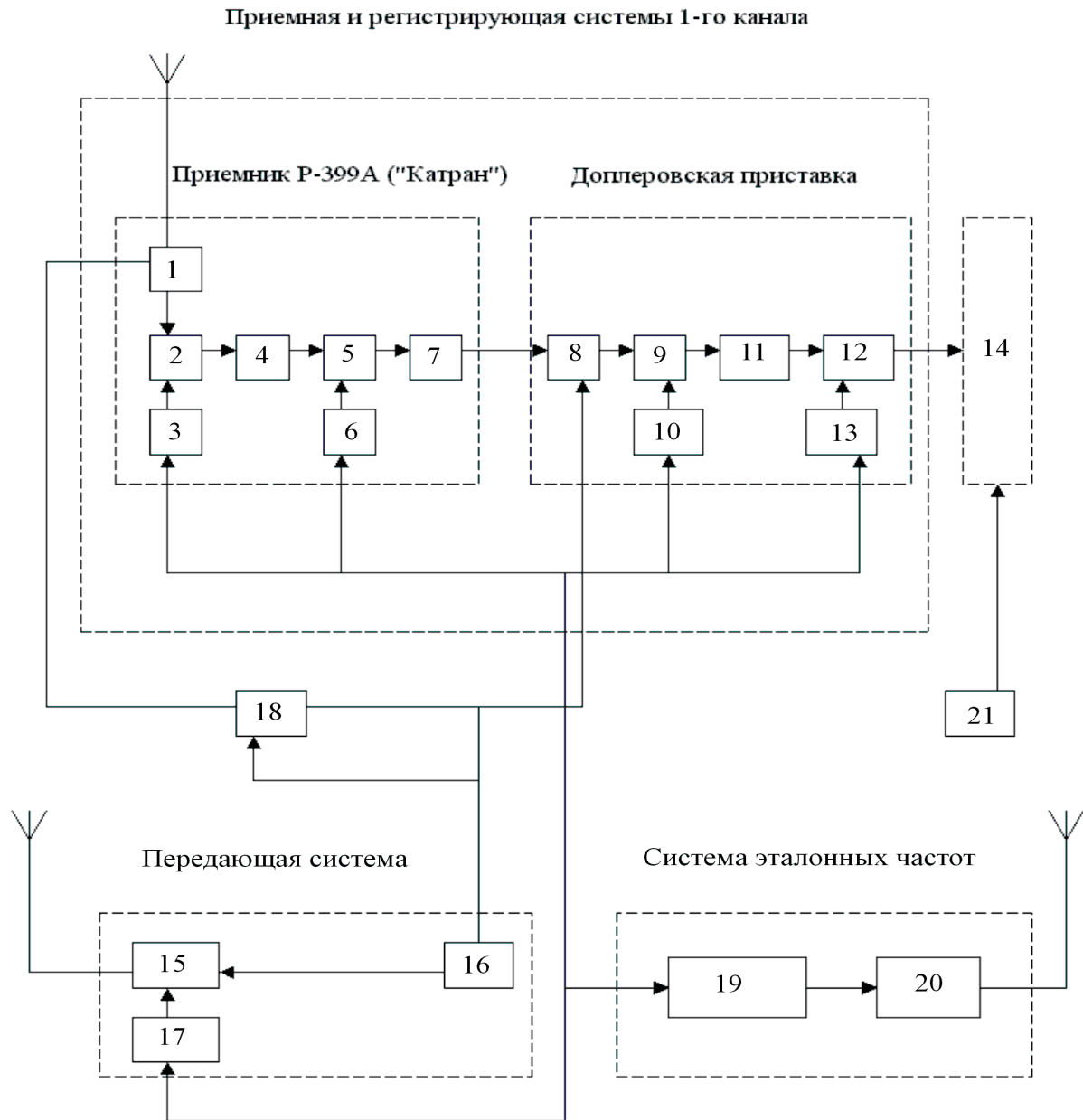


Рис.2.1. Функціональна схема доплерівського радара: 1 - підсилювач високих частот (ПВЧ); 2 - перший з'єднувач; 3 - 1-й гетеродин генератор; 4 - перший підсилювач суміжної частоти (ППЧ-1); 5 - другий з'єднувач; 6 - 2-й гетеродин генератор; 7 - ППЧ-2; 8 - коммутатор; 9 - 1-й балансний з'єднувач; 10 - опорний генератор 214 кГц; 11 - фільтр ( $\Delta f = 10$  Гц) з низькою ( $f = 1$  кГц) частоти (ФНЧ); 12 - 2-й балансний змішувач; 13 - генератор  $1 \text{ кГц} + \Delta f_{\text{он}}$ ; 14 - пристрій, котрий реєструє; 15 - передавач; 16 - модулятор; 17 - відтворювач частоти; 18 - схема замкнення; 19 - еталонний генератор; 20 - приймач - компаратор; 21 - система відміток часу.



### 2.3. Результати іоносферних досліджень методом Доплера

Найбільшим дослідженим видом доплерівських зсувів є неочікувані зсуви частоти, зумовлені іоносферними збуреннями за сплесків рентгенівського та жорсткого ультрафіолетового випромінювання в період сонячних спалахів. Загальнорозповсюдженим для цього явища є термін *sudden frequency deviation (SFD)*, котрий ввели Чен та Виллард в 1963 р. В результаті ходу експерименту були отримані прості зсуви, що складаються з таких як, позитивна початкова та подальшої негативної фаз, та складні, які мають "тонку структуру", через флуктуаційний потік сонячного випромінювання. Тривалість *SFD* варіюється в проміжку від 1 до 15 хв з найбільшим імовірним значенням приблизно 4 хв. В більшості випадків зміна саме цієї частоти не перевищує 1 Гц, як на той час частота досягає іноді десятків герц. Визначено факт, що *SFD* виникає одночасно практично на всій освітленій частині Землі, та навіть тонка структура спостережень  $f_d(t)$  повторюється у далеких один від одного пунктах спостережень, таким чином підтверджуючи, що це є ефект сонячного спалаху, а не результат місцевого збурення іоносфери [26-28].

Зареєстровані та описані варіації доплерівського зміщення частоти на всіх етапах затемнення Сонця (ЗС). Всі вони зумовлені насамперед зменшенням на 40%, а потім зростанням на 36% концентрації електронів на висотах приблизно 100 – 150 км. Зафіксовано появу на протязі ЗС квазіперіодичних варіацій доплерівських спектрів, котрі пов'язані з генерацією і розповсюдженням акустико-гравітаційних хвиль (АГХ) в атмосфері. Досліджено ефект "врегулювання" доплерівських спектрів, котрі супроводжували затемнення. Таким чином, це можна пояснити зменшенням плазмової турбулентності іоносфери на висотах приблизно 100 – 150 км.

Зміна концентрації електронів, пов'язана зі збуреннями геомагнітного поля Землі, котрий досліджуються багато років щодо змін характеристик розповсюдження через іоносферу радіосигналів. Понад 95% неочікуваних початків бур супроводжуються зі зміщенням частоти розповсюдженого радіосигналу. Відносно якісна кореляція знайдена між геомагнітними пульсаціями (*Pi2 – Pc5*) та короткоперіодними (0,5 – 5 хв) змінами доплерівського зсуву частоти (ДЗЧ). Зареєстровані ефекти як раптові магнітні імпульси впливають на іоносферу.

Є протилежні погляди, на ефективність збурень геомагнітного поля такого як джерела хвилеподібних неоднорідностей в  $F$  – шарі іоносфери. Виходячи з основ аналізу варіацій кутів через які приходить ДЗЧ сигналів радіостанцій можна зробити висновок, за якого висипання високоенергійних частинок в полярних каспах (областях) під період геомагнітних бур є основним чинником, котрий і викликає появу цих

дрейфуючих іоносферних збурень. Основуючись на спостереженнях при допомозі радару некогерентного розсіювання та вимірювання повного електронного вмісту було встановлено, що на ряду квазіперіодичних збурень повного змісту електронів це порушується на висотах більш як 100 км та може містити авроральне джерело, але загалом збурення мають метеорологічне походження. Неоднорідності електронної концентрації разом з горизонтальною фазовою швидкістю 250 – 1000 м / с та інтервалами від 10 хв до 1 години як і авроральне джерело відіграють доволі важливу роль. Зміна інтенсивностей варіації електронної концентрації в період геомагнітних збурень.

Старт ракети – носія (РН) із вмикненим двигуном викликає крупномасштабні збурення у інтервалі від шару  $E$  іоносфери та до висот, котрі перевищують, максимум  $F2$ -області. В шарі  $F2$  мають є два типи збурення:

а) значне та довготривале зменшення концентрації електронів, котре пов'язане із хімічними реакціями виділів згорання палива РН з навколишнім середовищем іоносфери;

б) поява хвилеподібних затухаючих коливань  $N$  через АГХ, котрі утворюються в області іоносфері під час польоту ракети з вмикненим двигуном. На висотах шару  $E$ , в свою чергу, можуть виникати коливання  $N$  з частим з'явленням спорадичного шару  $E_s$ . Потужні збурення в іоносфері, можуть бути також пов'язані з безпосередньо зі стартами та польотами потужних ракет. Перелічені результати відносяться, в цілому, до стартів та польотів ракет з великим енерговиділенням на середніх та низьких широтах.

Статистичний аналіз даних спостережень за іоносферою в період чотирьох геомагнітних бур демонструє зміну інтенсивності спектральних ліній коливань ДСЧ в різні моменти збурень. Також, ця мала інтенсивність розглянутих збурень не дозволяє точно розмірковувати про ефективність аврорального джерела для генерації хвилеподібних неоднорідностей, котрі відбуваються на середніх широтах.

При взаємодії з атмосферою та іоносферою продуктів виділення тягової установки ракет середнього або малого класу, котрі стартують із космодрому Плесецьк, це може приводити до таких ефектів в іоносфері та варіаціях геомагнітного поля, а саме:

– генерація альвенівських хвиль під час перетину ракетою динамо-ділянки іоносфери та подальшого стимулювання цими хвилями саме висипання авроральних електронів. Отримані експериментальні дані та теоретичні оцінки говорять, що саме такий ефект можливо спостерігати лише на  $L$ -шарах за плазмосферою. При деяких умовах це вимушене висипання електронів може також бути самопідтримуваним. В деяких випадках, коли магнітосфера "готова" до суббур, цим ефектом можливо стимулювати початок магнітосферних суббур, забезпечуючи "прив'язку" до часу початку саме цього збурення від часу перетину ракети динамо-області в іоносфері;

– генерації АГХ та пов'язаних з ними саме хвильових збурень в іоносфері. Інакше кажучи, цей ефект точно виділяється за іоносферними даними в магнітоспокійні періоди часу. В періоди магнітних коливань ефект не виділяється точно через відносно високий рівень фонових коливань в іоносфері;

– велике поглинання радіохвиль в іоносфері в період, коли ракета ще не встигла досягти динамо-ділянки іоносфери. Недолік цих статистичних експериментальних даних не дає змоги однозначно пов'язати такий ефект зі стартами ракет. Тим часом не менш якісно, такий ефект можливо пов'язати з процесами зміни атмосферного електричного поля в випромінення в радіодіапазоні та подальший висип енергетичних електронів до атмосфери. Такі зміни найбільш ефективні тоді, коли відбувається відокремлення першої ступені та включення другої ступені ракети [30-35].

Польоти ракет різноманітних типів та класів в нормальному (штатному) режимах, викликають найрізноманітніші зміни в іоносферній плазмі, котрі багаторазово досліджувалися вченими в науковій літературі. Але, не кожен політ можливо віднести до штатного. На різних висотах можуть виникнути різні аварійні ситуації. Саме тому із перерахованого можна сказати, що такі дослідження процесів іоносферних збурень при аварійних запусках РН являє собою безперечний науковий інтерес у вчених. Головний висновок, котрий можна виділити з проведених досліджень це те, що параметри іоносферних збурень в період вибуху РН за багатьма характеристиками в цілому відрізняються від тих збурень, що реєструються в період нормального польоту РН. Організовано постійний моніторинг за космодромами за допомогою засобів доплерівського КХ-зондування іоносфери та накопичення імперичних експериментальних даних, саме це дозволить найбільш чітко виділяти та оцінювати такі зміни в залежності від висот вибухів РН, що вважається найбільш важливим.

## 2.4. Висновки до розділу 2

1. Метод доплерівського зондування заснований на ефекті Доплера, котрий базується на варіації частоти хвилі в результаті зміни місця приймача (або передавача) або зміни параметрів. Обладнання, котре використовує таку наукову методику, в свою чергу, дозволяє проводити виміри доплерівської частоти  $f_a$  з точністю близької до 0,01 Гц. В найпростішому випадку, якщо можливо не брати до уваги вплив геомагнітного поля, то зіткнення часток та кривизну іоносфери, тобто для випадку саме вертикального поширення. Дані зміни зумовлені варіаціями електронної концентрації або в свою чергу, зміною висоти відбиття. В цілому в іоносфері відбуваються зміни обидвох типів, а залежність  $f_a$  від  $f$ , в свою чергу, матиме найбільш складний характер.

2. Комплекс вертикального ДЗ, який розміщений в РФО. В ньому втілений принцип одночасного

зондування, прийому та обробки випромінених сигналів на двох частотах. Установа вміщує в себе двоканалну систему радіопередавачів, дві передавальні антени, системи управління, обробки і реєстрації сигналу.

3. За останні роки, а точніше десятки років, дослідження іоносфери, методики вимірювання та обробки досконало змінилися: від визначення параметрів на двох частотах саме в доплерівських радарах до понад 40 в цифрових сучасних іонозондах. Останні прилади дають змогу отримати основні іоносферні параметри водночас на всіх висотах з інтервалом від 15 до 180 км.

4. Природні джерела енерговиділення це: спалахи на поверхні Сонця, проходження магнітних бур, виверження вулканів, землетруси, тощо.

5. Штучні джерела енерговиділення це: ядерні вибухи, вибухи в промисловості, запуски та падіння рвзноманітних космічних апаратів, лінії живлення електропередачі та ін.

6. Навколоземне середовище це відкрита система. "Зверху" до цієї системи потрапляє енергія від Сонця, з далекого космосу, "знизу" енергія надходить із літосфери, Світового океану та Земної атмосфери.

7. Стан космічної погоди тепер стає залежним від енерговиділення штучного походження, роль котрого на цей час вивчена недостатньо.

### 3. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ АНАЛІЗУ СИГНАЛІВ ДОПЛЕРІВСЬКОГО РАДІОЗОНДУВАННЯ

#### 3.1. Загальні положення

За допомогою методу доплерівського радіозондування в цілому вивчають тимчасові зміни доплерівських спектрів (ДС). Для встановлення періодів проходження хвильових збурень (ХЗ) періодичні залежності середньої частоти в доплерівських спектрах піддавались обробці та аналізу швидкому перетворенню Фур'є при різних інтервалах часу.

У методі ДЗ в цілому мінімальне значення доплерівського зміщення частоти  $f_{d\min} \approx 0,01-0,1$  Гц. Ці значення такого зсуву не є граничними.

Така чутливість даного методу для виявлення ХЗ буде [35-50]:

$$\delta_{Np} \approx \frac{T}{2\pi} \frac{c}{L_N} \frac{\Delta f_{dp}}{f} = \frac{1}{\pi} \frac{\lambda}{L_N} \frac{T}{T_d} \sqrt{\frac{3}{q}}, \quad (3.1.1)$$

де  $L_N$  – довжина області висот, котра складає суттєвий внесок в доплерівський ефект.

Розгалуження доплерівських спектрів такого сигналу теж викликане розсіянням хвилі котру зондують, саме випадковими неоднорідностями концентрації електронів.

Декількопроменевість призводить до декількомодовості, котрі спостерігаються на ДС

Роздільна здатність за період часу методу ДЗ приблизно 1 хв.

#### 3.2. Основи системного спектрального аналізу

Типове одномірне перетворення Фур'є, котре вже достатньо довго широко використовується в науці й техніці, виглядає [50-55]:

$$\hat{F}[f(t)] \equiv \dot{F}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \exp(-i\omega t) dt . \quad (3.2.1)$$

Основним мінусом такого типу перетворення Фур'є являється повна відсутність у  $\dot{F}(\omega)$  характеристик про стан на даний момент відповідних частотних даних по часовій осі.

Тоді наступним кроком для розвитку міркувань про перетворення Фур'є стала поява віконного перетворення Фур'є (ВПФ) котре виглядає наступним чином:

$$\hat{S}[f(t)] \equiv Sf(\omega, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) g(t-\tau) \exp(-i\omega t) dt . \quad (3.2.2)$$

В кінці функції спектральної густини (ФСГ) зворотного перетворення Фур'є (ЗПФ) водночас містить інформацію як і про тимчасові, так і про частотні характеристики аналізованого сигналу.

Але, ЗПФ має інший недолік, в ньому при вказуваній ширині віконної функції  $g(t)$  постійного допуску за часом, розподіл за частотою є також рівним для всіх частотних характеристик сигналу. Такого недоліку немає у вейвлет-перетворенні (ВП), котрий має адаптивні властивості. Постійне ВП функції виглядає [58]:

$$\hat{W}[f(t)] \equiv Wf(a,b) = \frac{1}{a^{1/2}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi \left( \frac{t-b}{a} \right) dt . \quad (3.2.3)$$

Висновки на основі цих перетворень доцільно використовувати для відображення раптових змін сигналу котрий досліджується. Комплексні вейвлети, в свою чергу, дають змогу розмежувати фазову та амплітудну компоненти такого сигналу, котре робить їх досить корисними для оцінювання миттєвих частот. ВП, котрі базуються на таких вейвлетах, мають назву аналітичних вейвлет-перетворень (АВП).

### 3.3. Висновки до розділу 3

1. ЗПФ, АПФ та ВП краще застосовувати разом.
2. ЗПФ, АПФ та ВП використовуються для визначення ХЗ в іоносфері та ХЗ в геомагнітному полі, пов'язаних не лише зі стартами ракет, а й проходженнями сонячних термінаторів, на фоні сильної хвильової активності. Виявлено, що АПФ та ВП можуть чітко локалізувати саме в періодно-часовій області для ХЗ, котрі настають в період старта ракети або проходження сонячних термінаторів.
3. Використовуючи метод ДЗ було розглянуто періодичні варіації доплерівських спектрів.

## 4. ОПИС РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 4.1. Загальні положення

Загалом велика увага приділяється системному підходу в дослідженнях різноманітних фізичних процесів у геокосмосі. Велике місце у таких дослідженнях посідає вивчення реакцій іоносфери на котру впливають джерела зі значним енерговиділенням. Це надає змогу прослідкувати подолання збуреннями значних глобальних відстаней, зрозуміти механізми подолання цих відстаней та фізичну природу такого «переносника», а також визначити особливості взаємодій різноманітних підсистем у системі Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера.

Як штучні джерела в роботі використовуються старту та польоти потужних ракет, котрі відбулися в 2019 р. з різних точок земної кулі та були віддаленими від місця спостереження приблизно на 1500 - 10000 км [55-60].

### 4.2. Ефекти в іоносфері, виявлені під час стартів ракет

Таблиця 4.1. Дані про місце та час старту ракет

10.01.19	19:11	LongMarch 3В	Ксічанг	Китай
11.01.19	17:31	Falcon 9	Канаверал	США
21.01.19	07:42	LongMarch 11	Ксічанг	Китай
24.01.19	20:08	PSLV	Шріхарікота	Індія
02.03.19	09:49	Falcon 9	Канаверал	США
14.03.19	21:14	Союз - ФГ	Байконур	Росія
22.03.19	03:50	Vega	Куру	Франція
04.04.19	14:01	Союз 2.1.А	Байконур	Росія
04.04.19	14:01	Союз 2.1.В	Плесецьк	Росія
17.04.19	23:46	Antares 230	Уоллопс	США
17.05.19	18:49	Long March 3С	Ксічанг	Китай
22.05.19	03:00	PSLV	Шріхарікота	Індія
23.05.19	01:49	Long March 4С	Ксічанг	Китай
24.05.19	05:30	Falcon 9	Канаверал	США
05.06.19	07:06	Long March 11	Ксічанг	Китай
12.06.19	17:17	Falcon 9	Канаверал	США
21.06.19	00:43	Ariane 5	Куру	Франція
24.06.19	21:09	Long March 3С	Ксічанг	Китай
25.06.19	09:30	Falcon 9	Канаверал	США
05.07.19	08:41	Союз 2.1.А	Байконур	Росія
11.07.19	04:53	Vega	Куру	Франція

20.07.19	19:28	Союз - ФГ	Байконур	Росія
22.07.19	12:13	GSLV	Шріхарікота	Індія
25.07.19	08:00	Hyperbola 1	Джіукван	Китай
26.07.19	01:01	Falcon 9	Канаверал	США
26.07.19	06:57	Long March 2C	Ксічанг	Китай
30.07.19	08:56	Союз 2.1.А	Байконур	Росія
31.07.19	15:10	Союз 2.1.А	Байконур	Росія
06.08.19	00:56	Proton M	Байконур	Росія
07.08.19	02:23	Falcon 9	Канаверал	США
08.08.19	13:10	Atlas 5	Канаверал	США
19.08.19	15:03	Long March 3B	Ксічанг	Китай
19.08.19	15:12	Electron	Rocket Lab LC-1	Нова Зеландія
22.08.19	06:38	Союз 2.1.А	Байконур	Росія
22.08.19	16:06	Delta 4	Канаверал	США
30.08.19	02:41	KZ-1A	Джіукван	Китай
30.08.19	17:00	Rocket	Плесецьк	Росія

Огляду, аналізу і статистичній обробці підлягали варіації ДЗЧ, котрі супроводжували запуски ракет в 2019 р. (Табл. 4.1). В цілому проаналізовано реєстрації для 37 запусків ракет, котрі стартували з космодромів США, Росії, Японії, Франції, Індії та інших країн.

Багато СР спостерігалися в перехідні час доби. При цьому ефекти від СР маскувалися ефектом викликаним рухом ранкового або вечірнього термінаторами.

У ряді випадків в іоносфері існує спорадичний шар  $E_s$ , що унеможливило доплерівське вимірювання.

Опишемо детально результат спостереження СР LongMarch 3B, котрий мав місце 10.01.2019 о 19:11 з космодрому Ксічанг (Китай)

З малюнка 7.1, видно що характер варіацій ДЗЧ змінився приблизно через 180 і 360 хвилин після старту ракети. Якщо прийняти що відстань між місцем СР і обсерваторією становило близько 5500 км, то вдавані швидкості поширення хвиль становили близько 460 і 230 м / с. Як відомо такі швидкості мають Акустикогравітаційні хвилі (АГХ) [Госард и Хуг].

Розглянемо ефекти в іоносфері котрі настали після СР LongMarch 11 (Рис. 7.2) 21.01.2019 в 7:42 з космодрому Ксічанг(Китай), строб 3.

Характерні варіації ДЗЧ через 70 і 220 хвилин після СР. Цьому часу запізнювання відповідають швидкості 1,2 км / с і 630 м / с. Великі швидкості мають повільні магнітогідродинамічні хвилі (ПМГД) [Сорокін, Федорович].



Менша швидкість відповідає швидкості акустикогравітаційних хвиль.

На малюнку 7.3 показані варіації ДЗЧ, що супроводжували за стартом ракети Falcon 9, 02.03.2019 в 9:49 з космодрому Канаверал (США), строб 4.

З малюнка 7.3 видно що характер варіацій ДЗЧ змінився приблизно через 44 хвилини після СР. Такому часу запізнювання відповідає вдавана швидкість 3.6 км / с. Наступні значна зміна варіацій спостерігалася о 15:18, тобто 370 хвилин після СР, чому відповідає вдавана швидкість 430 м/с. Таку швидкість мають АГХ.

Опишемо детально результат спостереження СР Союз 2.1.В, котрий мав місце 04.04.2019 о 14:01 з космодрому Плесецк (Росія) ( строб 9).

З малюнка 7.4, видно що характер варіацій ДЗЧ змінився приблизно через 70 хвилин після старту ракети. Якщо прийняти що відстань між місцем СР і обсерваторією становило близько 1500 км, то вдавана швидкість поширення хвиль становила близько 360 м/с. Як відомо таку швидкість мають АГХ.

Розглянемо ефекти в іоносфері котрі настали після СР Long March 2С 26.07.2019 в 06:57 з космодрому Ксічанг(Китай), строб 3. (мал.7.5)

Характерні варіації ДЗЧ спостерігались приблизно через 68 і 215 хвилин після СР. Цьому часу запізнювання відповідають швидкості 1,47 км/с і 430 м/с.

На малюнку 7.6 показані варіації ДЗЧ, котрі настали за стартом ракети Союз 2.1.А, 30.07.2019 в 08:56 з космодрому Байконур (Росія), строб 8.

З малюнка 7.6 видно що характер варіацій ДЗЧ змінився приблизно через 35 хвилини після СР. Такому часу запізнювання відповідає вдавана швидкість 1,14 км / с.

Опишемо детально результат спостереження СР Союз 2.1.А, котрий мав місце 31.07.2019 о 15:10 з космодрому Байконур (Росія) (строб 5).

З малюнка 7.7, видно що характер варіацій ДЗЧ змінився приблизно через 24, 85 і 180 хвилин після старту ракети. Якщо прийняти що відстань між місцем СР і обсерваторією становило близько 2400 км, то вдавані швидкості поширення хвиль становили близько 1,66 км/с, 470 і 220 м / с.

Розглянемо ефекти в іоносфері котрі настали після СР Long March 3В 19.08.2019 в 7:42 з космодрому Ксічанг(Китай), строб 9. (мал.7.8)

Характерні варіації ДЗЧ спостерігались через 90 хвилин після СР. Цьому часу запізнювання відповідає швидкість 1,1 км/с.

На малюнку 7.9 показані варіації ДЗЧ, що послідували за стартом ракети Союз 2.1.А, 22.08.2019 в 06:38 з космодрому Байконур(Росія), строб 4.

З малюнка 7.9 видно що характер варіацій ДЗЧ змінився приблизно

через 120 хвилини після СР. Такому часу запізнювання відповідає вдавана швидкість 330 м/с. Таку швидкість мають АГХ.

Опишемо детально результат спостереження СР Rokot, котрий мав місце 30.08.2019 о 17:00 з космодрому Плесецк (Росія) .

З малюнка 7.10, видно що характер варіацій ДЗЧ змінився приблизно через 45 і 65 хвилин після старту ракети. Якщо прийняти що відстань між місцем СР і обсерваторією становило близько 1500 км, то вдавані швидкості поширення хвиль становили близько 550 і 380 м/с. Як відомо такі швидкості мають АГХ.

Таблиця 4.2. Загальні відомості про запуски ракет.

№	Дата старту	Час старту	Назва ракети	Місце старту	Час затримки (хв)	Швидкість розповсюдження (км/с)
1	10.01.19	19:11	LongMarch 3В	Ксічанг (Китай)	$\Delta t_1 \approx 180$ $\Delta t_2 \approx 360$	$v_1' \approx 0,55$ $v_2' \approx 0,27$
2	21.01.19	07:42	LongMarch 11	Ксічанг (Китай)	$\Delta t_1 \approx 70$ $\Delta t_2 \approx 220$	$v_1' \approx 1,42$ $v_2' \approx 0,45$
3	02.03.19	07:39	Falcon 9	Канаверал (США)	$\Delta t_1 \approx 44$ $\Delta t_2 \approx 370$	$v_1' \approx 3,63$ $v_2' \approx 0,43$
4	04.04.19	14:01	Союз 2.1.В	Плесецк (Росія)	$\Delta t_1 \approx 70$	$v_1' \approx 0,35$
5	26.07.19	06:57	LongMarch 2С	Ксічанг(Китай)	$\Delta t_1 \approx 68$ $\Delta t_2 \approx 215$	$v_1' \approx 1,47$ $v_2' \approx 0,43$
6	30.07.19	08:56	Союз 2.1.А	Байконур (Росія)	$\Delta t_1 \approx 35$	$v_1' \approx 1,14$
7	31.07.19	15:10	Союз 2.1.А	Байконур (Росія)	$\Delta t_1 \approx 24$ $\Delta t_2 \approx 85$ $\Delta t_3 \approx 180$	$v_1' \approx 1,66$ $v_2' \approx 0,47$ $v_3' \approx 0,22$
8	19.08.19	09:34	LongMarch 3В	Ксічанг(Китай)	$\Delta t \approx 90$	$v_1' \approx 1,1$
9	22.08.19	06:38	Союз 2.1.А	Байконур (Росія)	$\Delta t \approx 120$	$v_1' \approx 0,33$
10	30.08.19	17:00	Rokot	Плесецк (Росія)	$\Delta t_1 \approx 45$ $\Delta t_2 \approx 65$	$v_1' \approx 0,55$ $v_2' \approx 0,38$

### 4.3. Висновки до розділу 4

1. Найбільший позитивний ДЗЧ (0,8 Гц), фіксувався після сходу Сонця.
2. Найбільш довготривалі коливання (30 – 70 хв) загалом фіксувалися після заходу Сонця.
3. Опрацьовано 38 реєстрації ДЗЧ, котрі спостерігалися під час стартів ракет із різноманітних космодромів світу: Байконур (Казахстан), Плесецьк (Росія), Джіуцван (Китай), Шрихарікота (Індія), Танегасима (Японія), Куру (Франція), Канаверал (США).
4. Очікувані реакції іоносфери на запуск ракети спостерігалась в 10 випадках із 38. Ефекти під час стартів ракет малої та середньої потужності з різноманітних космодромів, швидше за все, не вдалося зафіксувати.
5. В ході більш детального огляду варіацій доплерівських спектрів, котрі супроводжували 10 запусків ракет, встановлені три групи швидкостей за яких розповсюджуються збурення: 0,2 – 0,9; 1 – 2 і 3 – 4 км / с. Реакція що до СР впевнено спостерігалися в більшості випадків.

## 5. ВИСНОВКИ

1. На іоносферу весь час впливають джерела як природного походження, так і штучного (антропогенного). До перших джерел можна віднести спалахи на Сонці, проходження магнітних бур, потужне виверження вулканів, землетруси, тощо. До антропогенних джерел енерговиділення відносять ядерні вибухи, вибухи в промисловості, старту та падіння різноманітних космічних апаратів, лінії електропередачі, тощо. Взагалі, енергетика таких впливів на навколосемне середовище за останні роки стала порівнянна.

2. Метод доплерівського зондування ґрунтується на ефекті Доплера. Ефект полягає у вимірюванні характеристик сигналу та аналізі ДЗЧ відображених радіохвиль, викликаного через нестационарні процеси в середній іоносфері.

3. Доплерівський радар ХНУ імені В. Н. Каразіна надає змогу досліджувати ці самі нестационарні процеси в іоносфері, якщо величина концентрації електронів буде змінюватись на величину котра буде не менше 1% за типовий час 1 – 10 хвилин. Пристрій працює в діапазоні робочих частот 3 – 30 МГц, характерне співвідношення параметру сигнал/шум складає  $10^2 - 10^6$ , похибка його вимірювання – складає не вище 0,01 Гц при висотному розподілу 75 км і розподілу за часом близько однієї хвилини.

4. Проаналізовано отримані результати статистичних вимірювань, котрі виконані в різноманітні сезони, та в різноманітний час доби в близі ранкового та вечірнього термінаторів, у різноманітних геофізичних умовах та при різних величинах збуреностей геомагнітного поля Землі.

5. Вивчено реакції геокосмосу на запуски та польоти ракет й інших космічних апаратів. В цілому проаналізовано 38 стартів, котрі мали місце з космодромів Росії, США, Китаю, Казахстану. Відстані від космодромів до обсерваторії варіювались від 1500 до 9300 км. Спостерігалися 3 групи швидкостей 0,2 – 0,9 км / с, 1 – 2 км / с, 3 – 4 км / с.

## 6. СПИСОК ЛИТЕРАТУРИ

1. Черногор Л. Ф. О нелинейности природе и науке: Монография. – Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2008. – 528 с.
2. Черногор Л. Ф. Радиофизические и геомагнитные эффекты стартов ракет / Черногор Л. Ф. – Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2009. – 386 с.
3. Черногор Л. Ф. Воздействие ракетно-космической техники на окружающую среду. Под общей редакцией В. В. Адушкина, С. И. Козлова, М. В. Сильникова – Москва, ГЕОС, 2016. – 795 с.; +40 с. ил.
4. Rocket Burnand Launch in the Near – the – Earth Environment.: Boca Raton, London, New York, 2017. – 542 p.
5. Черногор Л. Ф. Дистанционное радиозондирование атмосферы и космоса / Черногор Л. Ф. – Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2009. – 500 с.
6. Бурмака В. П., Костров Л. С., Черногор Л. Ф. Статистические характеристики сигналов доплеровского ВЧ радара при зондировании средней ионосферы, возмущенной стартами и солнечным терминатором // Радиофизика и радиоастрономия. – 2003. – Т. 8. – № 2. – С. 143 – 162.
7. Черногор Л. Ф., Гармаш К. П., Поднос В. А., Тырнов О. Ф. Радиофизическая обсерватория Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина – средство для мониторинга ионосферы в космических экспериментах // Космический проект «Ионосат – Микро» – К.: Академперіодика, 2013. – с. 160 – 182.
8. Лазоренко О. В., Черногор Л. Ф. Сверхширокополосные сигналы и процессы: Монография. – Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2009. – 576 с
9. Карлов В. Д., Козлов С. И., Ткачев Г. Н. Крупномасштабные возмущения в ионосфере, возникающие при полете ракеты с работающими двигателем (Обзор) // Космич. исслед. – 1980. – Т. 18. – №2. – С. 319 – 322.
10. Мисюра В. А., Пахомова О. В., Черногор Л. Ф. Исследование глобальных и крупномасштабных возмущений в ионосфере с помощью сети ионозондов // Космическая наука и техника. – К.: Наукова думка, 1989. – Вып. 4. – С. 72 – 75.
11. Пахомова О. В., Черногор Л. Ф. Кажущиеся скорости распространения возмущений в околоземном космосе // Космическая наука и техника. – К.: Наукова думка, 1990. – Вип. 5. – С. 71 – 74.
12. Костров Л. С., Розуменко В. Т., Черногор Л. Ф. Доплеровское радиозондирование естественно-возмущенной средней ионосферы // Радиофизика и радиоастрономия. – 1999. – Т. 4. – № 3. – С. 209 – 226.
13. Костров Л. С., Розуменко В. Т., Черногор Л. Ф. Доплеровское радиозондирование возмущений средней ионосферы, сопровождающих старты и полеты космических аппаратов // Радиофизика и радиоастрономия. – 1999. – Т. 4. – № 3. – С. 227 – 246.
14. Бурмака В. П., Костров Л. С., Черногор Л. Ф. Статистические характеристики сигналов доплеровского ВЧ радара при зондировании средней ионосферы, возмущенной стартами и солнечным терминатором //

Радиофизика и радиоастрономия. – 2003. – Т. 8. – № 2. – С. 143 – 162

15. Черногор Л. Ф. Физика мощного радиоизлучения в геокосмосе / Черногор Л. Ф. – Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2014. – 544 с. : 183 ил., 65 табл., 674 библиогр.

16. Гуревич А. В. Исследование нелинейных явлений при распространении мощного радиоимпульса в нижних слоях ионосферы / А. В. Гуревич, И. С. Шлюгер // Изв. вузов. Радиофизика. – 1975. – Т. 18, № 9. – С. 1237–1260.

17. Гармаш К. П. Возникновение крупномасштабных возмущений в ионосфере, инициируемых мощным нестационарным радиоизлучением / К. П. Гармаш, Л. Ф. Черногор, А. Б. Шварцбург // Компьютерная оптика. – 1989. – Вып. 6. – С. 62–71.

18. Техника, методика и результаты комплексных исследований нижней ионосферы / В. А. Мисюра, И. С. Шлюгер, Ю. К. Часовитин и др. // Космические исследования на Украине. – 1974. – № 5. – С. 63–67.

19. Черногор Л. Ф. Интегральное возмущение ионосферы последовательностью мощных радиоимпульсов / Л. Ф. Черногор // Вестник Харьковского университета. Сер. : «Радиофизика и электроника». – 1978. – № 163. – С. 10–15.

20. Гуревич А. В. Изменение ионизации нижней ионосферы под действием мощных радиоволн / А. В. Гуревич, Г. М. Милих, И. С. Шлюгер // Изв. вузов. Радиофизика. – 1977. – Т. 20, № 12. – С. 1790–1804.

21. Возмущение неоднородной структуры и регулярных параметров нижней ионосферы на высоких и средних широтах мощным непрерывным и импульсным радиоизлучением / С. И. Мартыненко, В. А. Мисюра, Л. Ф. Черногор и др. // Эффекты искусственного воздействия мощным радиоизлучением на ионосферу Земли: материалы Всесоюз. симпозиума. Суздаль, сент. 1983. – М. : ИЗМИРАН, 1983. – С. 94–95.

22. Черногор Л. Ф. Нестационарные процессы в ионосфере, возмущаемой мощным радиоизлучением / Л. Ф. Черногор // 14 Всес. конф. по распространению радиоволн : тезисы докладов. – Ч. 1. – М. : Наука, 1984. – С. 117–120.

23. Исследование естественной и искусственно возмущенной мощным радио-излучением нижней полярной ионосферы при помощи высокочастотного зондирования / А. М. Гоков, С. И. Мартыненко, Л. Ф. Черногор и др. // II Всесоюз. совещание по полярной ионосфере и магнитосферно-ионосферным связям. Норильск, 1980 : тезисы докладов. – Иркутск, 1980. – С. 32–33.

24. Ослабление высокочастотных радиоволн в искусственно возмущенной мощным радиоизлучением нижней высокоширотной ионосфере / С. И. Мартыненко, В. А. Мисюра, Л. А. Пивень и др. // Изв. вузов. Радиофизика. – 1983. – Т. 26, № 1. – С. 3–6.

25. Влияние крупномасштабных возмущений, вызываемых мощным коротко-волновым радиоизлучением, на характеристики частично

отраженных и проходящих радиосигналов / А. И. Гритчин, А. А. Губарев, Л. Ф. Черногор и др. // Региональная науч.-техн. конф. : тезисы докладов. – Новосибирск, 1985. – С. 9–10.

26. Об исследовании крупномасштабных возмущений в ионосфере / А. А. Губарев, Л. С. Костров, Л. Ф. Черногор и др. // Всесоюзн. симпоз. по солнечно-земной физике : программа и тезисы докладов. – Иркутск, 1986. – С. 105–106.

27. О возможности исследования возмущений нижней ионосферы по амплитудам и доплеровскому смещению частоты радиосигналов различных диапазонов / А. А. Губарев, Л. С. Костров, Л. Ф. Черногор и др. // Второй Всесоюзн. симпоз. по результатам исследования средней атмосферы : тезисы докладов. – М., 1986. – С. 72.

28. Исследование возмущений нижней ионосферы методом частичных отражений / К. П. Гармаш, А. И. Гритчин, Л. Ф. Черногор и др. // Второй Всесоюзн. симпоз. по результатам исследования средней атмосферы : тезисы докладов. – М., 1986. – С. 60–61.

29. Пахомова О. В. Изучение методом вертикального зондирования реакции ионо-сферы на воздействие мощного радиоизлучения / О. В. Пахомова, Л. Ф. Черногор // Вестник Харьковского университета. Сер. : «Радиофизика и электроника». – 1988. – № 318. – С. 29–30.

30. Черногор Л. Ф. Статистические характеристики крупномасштабных возмущений в ионосфере, инициируемых воздействием мощного нестационарного радиоизлучения / Л. Ф. Черногор // Геомагнетизм и аэрномия. – 1989. – Т. 29, № 3. – С. 513–515.

31. Влияние искусственных возмущений в нижней ионосфере, инициируемых мощным нестационарным радиоизлучением, на характеристики радиосигналов / К. П. Гармаш, А. И. Гритчин, Л. Ф. Черногор и др. // Труды НИИР. – 1989. – № 2. – С. 57–60.

32. Костров Л. С. Доплеровское зондирование крупномасштабных возмущений в ионосфере, генерируемых мощным радиоизлучением / Л. С. Костров, Л. Ф. Черногор // Геомагнетизм и аэрномия. – 1990. – Т. 30, № 1. – С. 159–161.

33. Complex radiophysical investigations of large-scale disturbances in the ionosphere, initiated by powerful radio-frequency radiation / K. P. Garmash, A. I. Gritchin, L. F. Chernogor et al. // Proc. of the III Suzdal Sympos. on Modification of the Ionosphere by Powerful Radio Waves (ISIM-3). – Moscow, 1991. – P. 121–122.

34. Phenomenon of arising stimulated localized and large scale disturbances in the ionosphere under the influence of powerful radiofrequency radiation / L. F. Chernogor, K. P. Gar-mash, S. G. Leus et al. // Physics in Ukraine: international conference, Kiev, 22–27 June 1993. – Kiev, 1993. – P. 62–66.

35. Гармаш К. П. Исследование крупномасштабных возмущений в ионосфере, вызванных мощным радиоизлучением, методом частичных отражений в разнесенных пунктах / К. П. Гармаш, А. И. Гритчин, Л. Ф. Черногор // 17 конф. по распространению радиоволн. Ульяновск, сентябрь 1993 г. : тезисы докладов, секции 6, 7, 8. – Ульяновск, 1993. – С. 18.
36. Экспериментальное исследование крупномасштабных возмущений в около-земной плазме, инициируемых мощным радиоизлучением / К. П. Гармаш, С. Г. Леус, Л. Ф. Черногор и др. // Физика космической плазмы: труды международного семинара, Киев, 6–10 июня 1993 г. – К., 1994. – С. 182–191.
37. Wright J. W. Evidence for precipitation of energetic particles by ionospheric heating transmission / J. W. Wright // J. Geophys. Res. – 1975. – V. 80, N. 31. – P. 4383–4386.
38. Ройзен А. М. Эффекты, наблюдаемые при вертикальном зондировании авро-ральной ионосферы, возмущенной мощным КВ-излучением / А. М. Ройзен // Исследование ионосферы и магнитосферы методами активного воздействия. – Апатиты, 1977. – С. 62–69.
39. О результатах наблюдений, проводимых при вертикальном зондировании области высокоширотной ионосферы, возмущенной мощным радиоизлучением / И. Н. Бардеев, И. Н. Капустин, А. Д. Кравцов и др. // Исследование процессов в авро-ральной ионосфере методами активного воздействия. – Апатиты, 1978. – С. 43–50.
40. Перцовский Р. А. Экспериментальное исследование рассеяния радиосигнала от области ионосферы, подверженной воздействию мощного радиоизлучения / Р. А. Перцовский, Б. В. Ткаченко // Исследование ионосферы и магнитосферы методами активного воздействия. – Апатиты, 1977. – С. 49–54.
41. Daytime Scintillations Induced by High-Power HF Waves at Tromsø, Norway / Santimay Basu, Sunanda Basu, P. Stubbe // J. Geophys. Res. – 1987. – V. 92, N. A10. – P. 11149–11157.
42. Черногор Л. Ф. Геокосмосфера – открытая динамическая нелинейная система / Л. Ф. Черногор // Вісник Харківського університету. Сер. : «Радіофізика та електроніка». – 2002. – № 570, вип. 2. – С. 175–180.
43. Черногор Л. Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы / Л. Ф. Черногор // Радиофизика и радиоастрономия. – 2003. – Т. 8, № 1. – С. 59–106.
44. Черногор Л. Ф. Земля – атмосфера – геокосмос как открытая динамическая нелинейная система / Л. Ф. Черногор // Космічна наука і технологія. – 2003. – Т. 9, № 5/6. – С. 96–105.
45. Черногор Л. Ф. Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. 1 / Л. Ф. Черногор // Нелинейный мир. – 2006. – Т. 4, № 12. – С. 655–697.



46. Черногор Л. Ф. Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. 2 / Л. Ф. Черногор // *Нелинейный мир*. – 2007. – Т. 5, № 4. – С. 198–231.
47. Черногор Л. Ф. О нелинейности в природе и науке : монография / Л. Ф. Черногор. – Х. : ХНУ имени В. Н. Каразина. 2008. – 528 с.
48. Chernogor L. F., Rozumenko V. T. Earth – Atmosphere – Geospace as an Open Nonlinear Dynamical System // *Radio Physics and Radio Astronomy*. – 2008. – V. 13, № 2. – Pp. 120–137.
49. Chernogor L. F. The Earth-atmosphere-geospace system: main properties and processes / L. F. Chernogor // *International Journal of Remote Sensing*. – 2011. – V. 32, N. 11. – P. 3199–3218.
50. Черногор Л. Ф. Солнце – межпланетная среда – магнитосфера – ионосфера – атмосфера – Земля как открытая неравновесная нелинейная физическая система. 1 / Л. Ф. Черногор // *Журнал проблем эволюции открытых систем*. – 2011. – Т. 1, вып. 13. – С. 22–66.
51. Черногор Л. Ф. Солнце – межпланетная среда – магнитосфера – ионосфера – атмосфера – Земля как открытая неравновесная нелинейная физическая системы. 2 / Л. Ф. Черногор // *Журнал проблемы эволюции открытых систем*. – 2013. – Т. 1, вып. 15. – С. 43–87.
52. Пахомова О. В. Изучение методом вертикального зондирования реакции ионосферы на воздействие мощного радиоизлучения / О. В. Пахомова, Л. Ф. Черногор // *Вестник Харьковского университета. Сер. : «Радиофизика и электроника»*. – 1988. – № 318. – С. 29–30.
53. Гармаш К. П. Возникновение крупномасштабных возмущений в ионосфере, инициируемых мощным нестационарным радиоизлучением / К. П. Гармаш, Л. Ф. Черногор, А. Б. Шварцбург // *Компьютерная оптика*. – 1989. – Вып. 6. – С. 62–71.
54. Черногор Л. Ф. Статистические характеристики крупномасштабных возмущений в ионосфере, инициируемых воздействием мощного нестационарного излучения / Л. Ф. Черногор // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 1989. – Т. 29, № 3. – С. 513–515.
55. Мисюра В. А. Исследование глобальных и крупномасштабных возмущений в ионосфере с помощью сети ионозондов / В. А. Мисюра, О. В. Пахомова, Л. Ф. Черногор // *Космическая наука и техника*. – 1989. – Вып. 4. – С. 72–75.
56. Влияние искусственных возмущений в нижней ионосфере, инициируемых мощным нестационарным радиоизлучением, на характеристики радиосигналов / К. П. Гармаш, А. И. Гритчин, Л. Ф. Черногор и др. // *Труды НИИР*. – 1989. – № 9. – С. 57–60.
57. Пахомова О. В. Кажущиеся скорости распространения возмущения в около-земном космосе / О. В. Пахомова, Л. Ф. Черногор // *Космическая наука и техника*. – 1990. – Вып. 5. – С. 71–74.

58. Костров Л. С. Доплеровское радиозондирование крупномасштабных волновых возмущений в ионосфере, генерируемых мощным радиоизлучением / Л. С. Костров, Л. Ф. Черногор // Геомагнетизм и аэрономия. – 1990. – Т. 30, № 1. – С. 159–161.

59. Гармаш К. П. Эффекты в околоземной плазме, стимулированные воздействием мощного радиоизлучения / К. П. Гармаш, Л. Ф. Черногор // Успехи современной радио-электроники. – 1998. – № 6. – С. 17–40.

60. Гармаш К. П. Электромагнитные и геофизические эффекты в околоземной плазме, стимулированные воздействием мощного радиоизлучения / К. П. Гармаш, Л. Ф. Черногор // Электромагнитные явления. – 1998. – Т. 1, № 1. – С. 90–110.

61. Гармаш К. П. Профили электронной концентрации D-области ионосферы в спокойных и возмущенных условиях по данным частичных отражений / К. П. Гармаш, Л. Ф. Черногор // Геомагнетизм и аэрономия. – 1996. – Т. 36, № 2. – С. 75–81.

62. Влияние крупномасштабных возмущений, вызываемых мощным коротко-волновым радиоизлучением, на характеристики частично отраженных и проходящих радиосигналов / А. И. Гритчин, А. А. Губарев, Л. Ф. Черногор и др. // Региональная науч.-техн. конф. : тез. докл. – Новосибирск, 1985. – С. 9–10.

63. Об исследовании крупномасштабных возмущений в ионосфере / А. А. Губарев, Л. С. Костров, Л. Ф. Черногор и др. // Всесоюзн. симпоз. по солнечно-земной физике : программа и тез. докл. – Иркутск, 1986. – С. 105–106.

64. О возможности исследования возмущений нижней ионосферы по амплитудам и доплеровскому смещению частоты радиосигналов различных диапазонов / А. А. Губарев, Л. С. Костров, Л. Ф. Черногор и др. // Второй Всесоюзн. симпоз. по результатам исследования средней атмосферы : тез. докл. – М., 1986. – С. 72.

65. Исследование возмущений нижней ионосферы методом частичных отражений / К. П. Гармаш, А. И. Гритчин, Л. Ф. Черногор и др. // Второй Всесоюзн. симпоз. по результатам исследования средней атмосферы : тез. докл. – М., 1986. – С. 60–61.

66. Complex radiophysical investigations of large-scale disturbances in the ionosphere, initiated by powerful radio-frequency radiation / K. P. Garmash, A. I. Gritchin, L. F. Chernogor et al. // Proc. of the III Suzdal Sympos. on Modification of the Ionosphere by Powerful Radio Waves (ISIM-3). – Moskow, 1991. – P. 121–122.

67. Phenomenon of arising stimulated localized and large scale disturbances in the ionosphere under the influence of powerful radiofrequency radiation / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, S. G. Leus et al. // Physics in Ukraine: international conference, Kiev, 22–27 June 1993. – Kiev, 1993. – P. 62–66.

68. Гармаш К. П. Исследование крупномасштабных возмущений в ионосфере, вызванных мощным радиоизлучением, методом частичных отражений в разнесенных пунктах / К. П. Гармаш, А. И. Гритчин, Л. Ф. Черногор // 17 конф. по распространению радиоволн. Ульяновск, сентябрь 1993 г. : тез. докл., секции 6, 7, 8. – Ульяновск, 1993. – С. 18.

69. Экспериментальное исследование крупномасштабных возмущений в около-земной плазме, инициируемых мощным радиоизлучением / К. П. Гармаш, С. Г. Леус, Л. Ф. Черногор и др. // Физика космической плазмы: труды международного семинара, Киев, 6–10 июня 1993 г. – К., 1994. – С. 182–191.

70. Черногор Л. Ф. Фазовые вариации километровых радиоволн, сопутствовавшие воздействию на ионосферу мощного радиоизлучения / Л. Ф. Черногор // Радиофизика и радиоастрономия. – 2009. – Т. 14, № 4. – С. 377–389.

71. Лазоренко О. В. Адаптивное преобразование Фурье / О. В. Лазоренко, С. В. Панасенко, Л. Ф. Черногор // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2006. – Т. 10, № 10. – С. 39–49.

72. Бурмака В. П. Современные методы спектрального анализа квазипериодических процессов в геокосмосе / В. П. Бурмака, С. В. Панасенко, Л. Ф. Черногор // Успехи современной радиоэлектроники. – 2007. – № 11. – С. 3–24.

73. Черногор Л. Ф. Современные методы спектрального анализа квазипериодических и волновых процессов в ионосфере: особенности и результаты экспериментов / Л. Ф. Черногор // Геомагнетизм и аэрономия. – 2008. – Т. 48, № 5. – С. 681–702.

74. Davies K. Ionospheric radio / K. Davies. – London: Peter Peregrinus Ltd., 1990. – 580 p.

75. Флуктуации сверхдлинных радиоволн в волноводе Земля – ионосфера / В. Г. Безродный, П. В. Блюх, Р. С. Шубова, Ю. М. Ямпольский. – М. : Наука, 1984. – 144 с.

76. Казимировский Э. С. Движения в ионосфере / Э. С. Казимировский, В. Д. Какоуров. – Новосибирск : Наука, 1979. – 344 с.

77. Рабинович М. И. Введение в теорию колебаний и волн : учебное пособие / М. И. Рабинович, Д. И. Трубецков. – М. : Наука, 1984. – 432 с.

## 7. ДОДАТОК

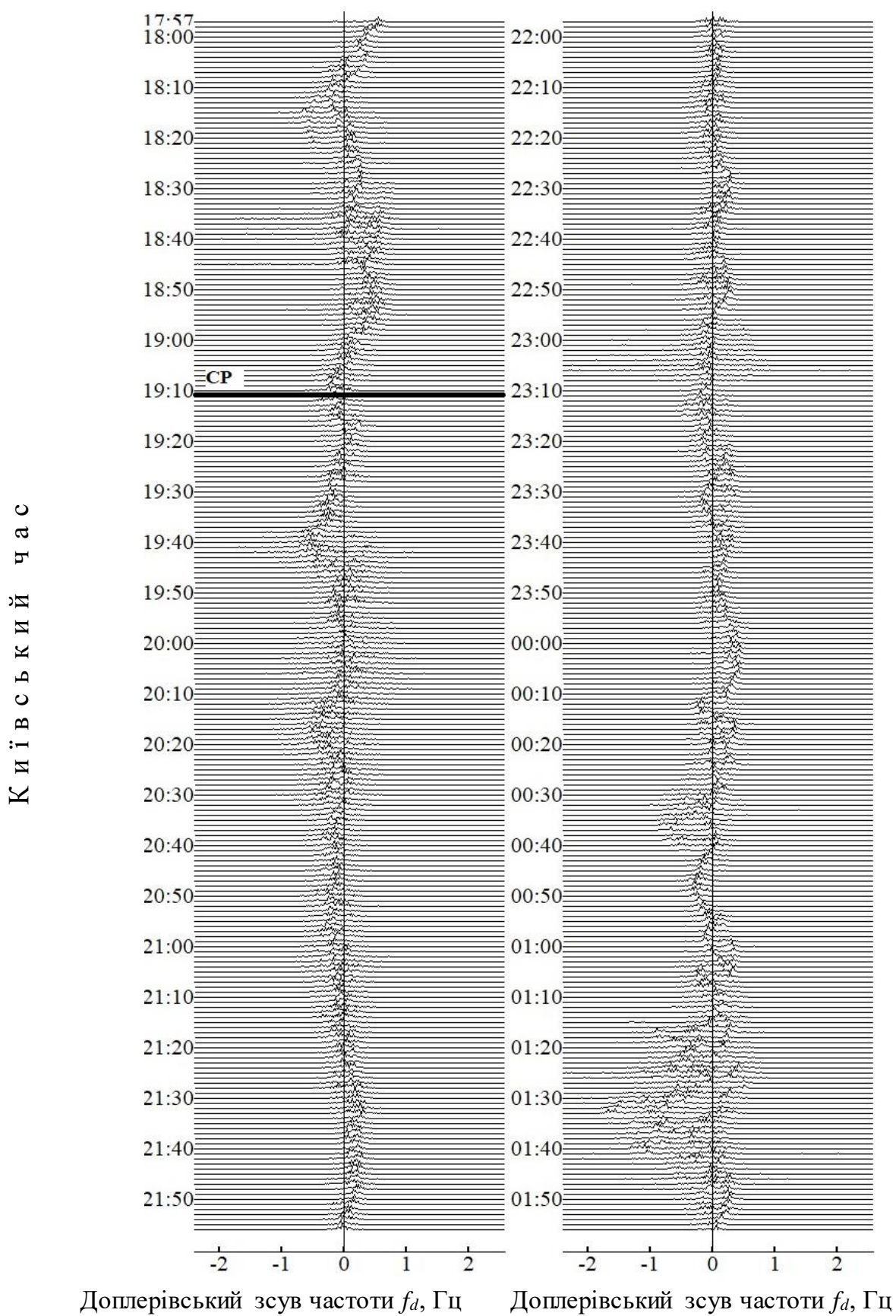


Рис. 7.1а Старт ракети "Long March 3В " 10.01.2019 о 19:11 з космодрому Ксічанг (Китай), строб 05

Київський час

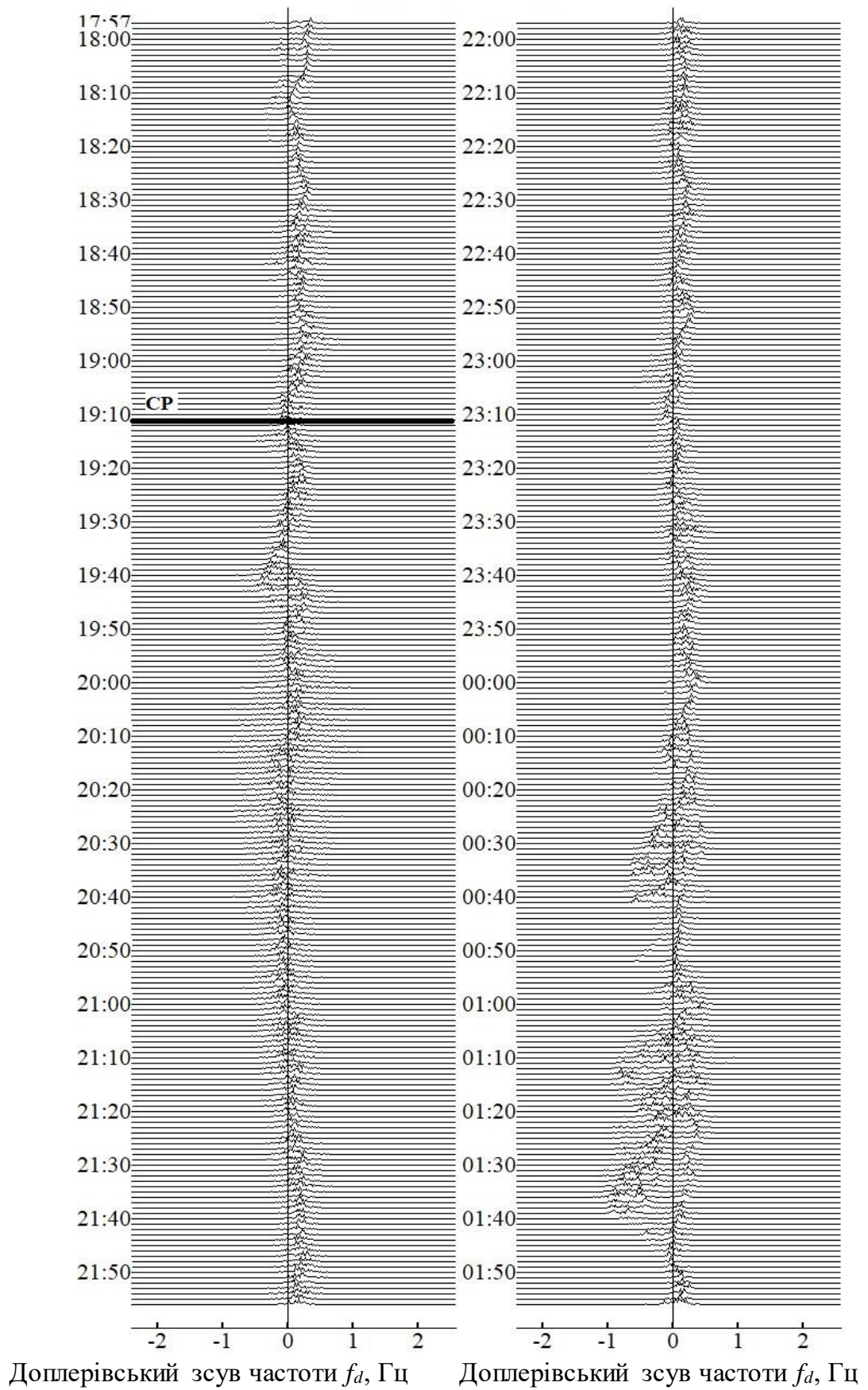


Рис. 7.16. Старт ракети "Long March 3В " 10.01.2019 о 19:11 з космодрому Ксічанг (Китай), строб 09

К и ї в с ь к и й ч а с

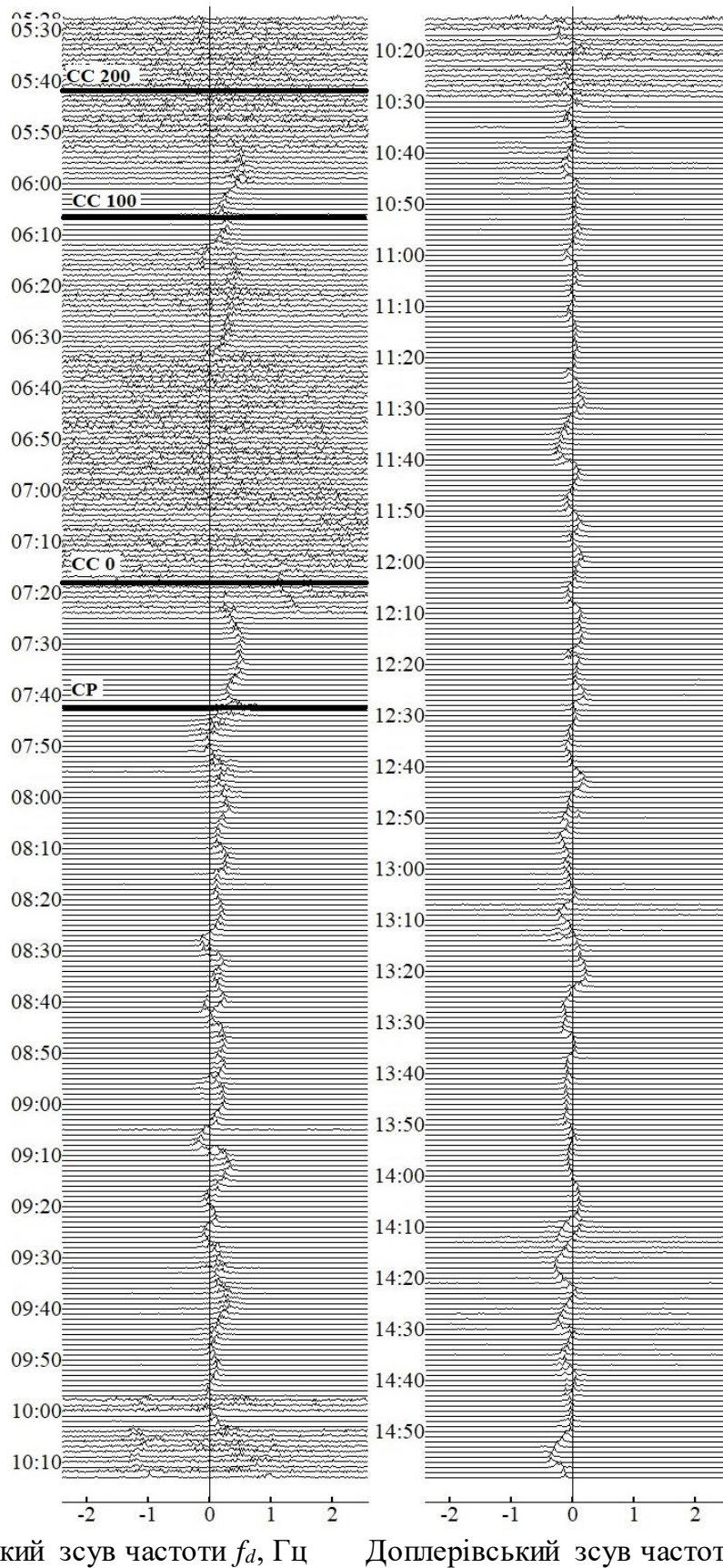
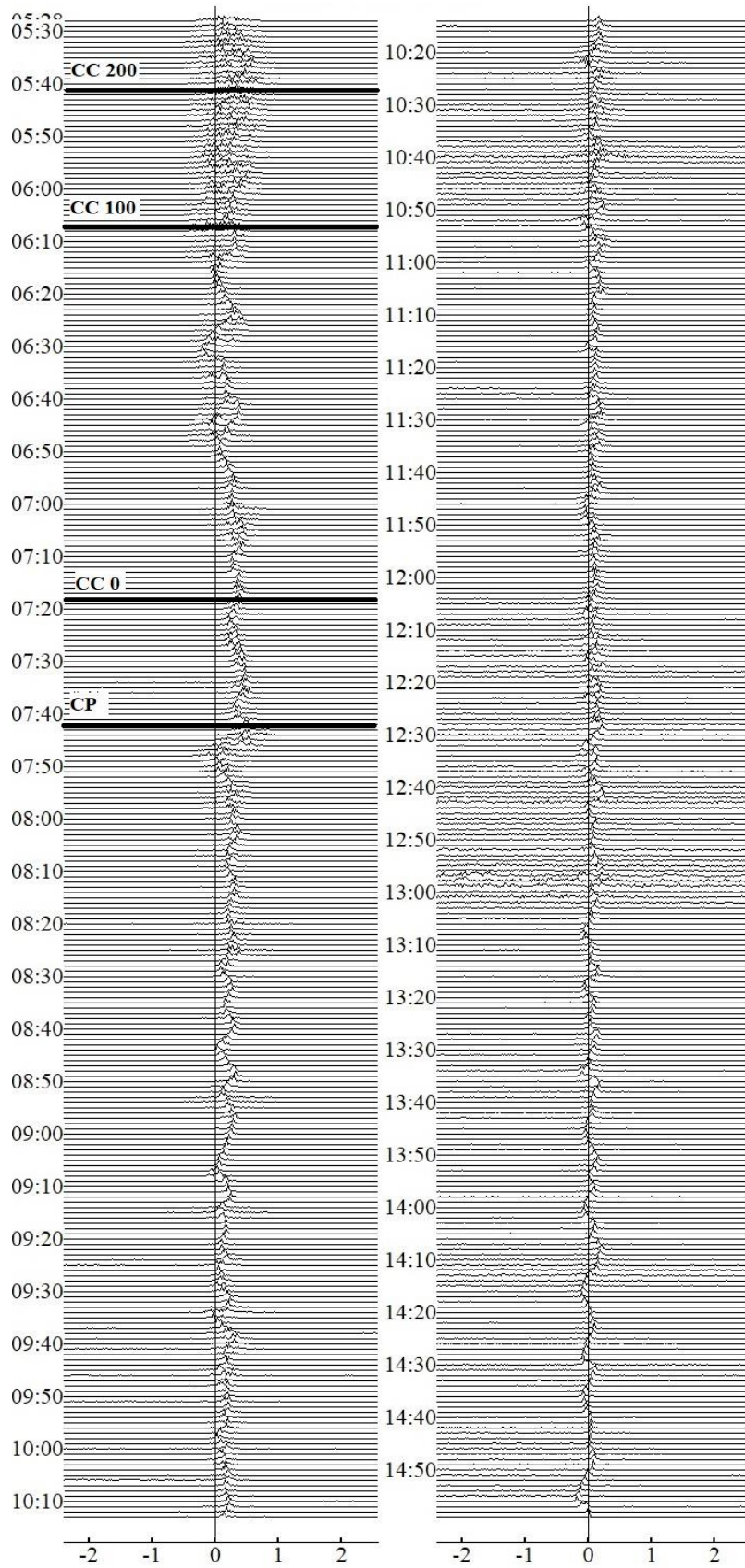


Рис. 7.2а. Старт ракети "Long March 11" 21.01.2019 о 07:42 з космодрому Ксічанг(Китай), строб 03

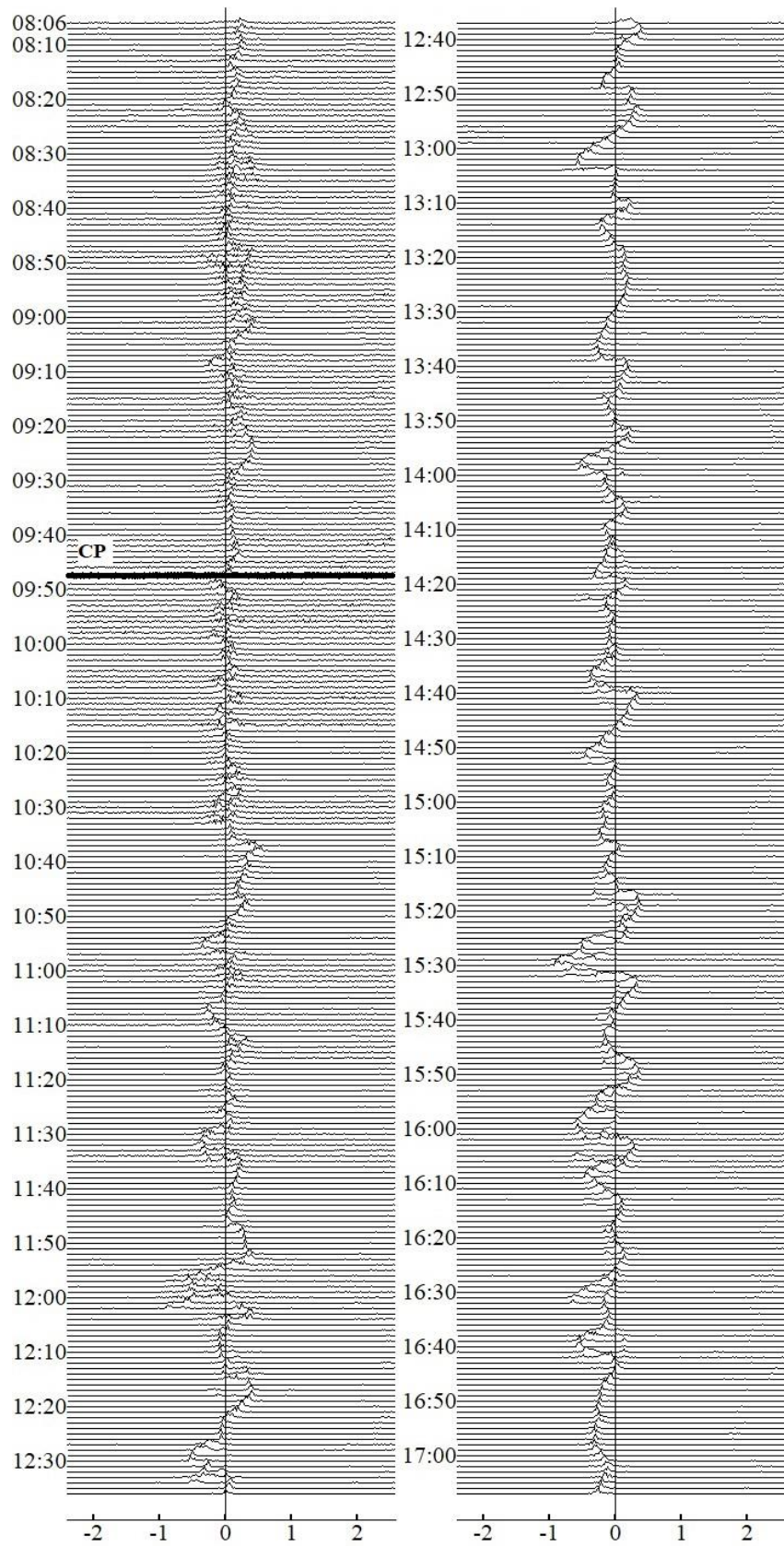
Київський час



Доплерівський зсув частоти  $f_d$ , Гц      Доплерівський зсув частоти  $f_d$ , Гц

Рис. 7.26. Старт ракети "Long March 11" 21.01.2019 о 07:42 з космодрому Ксічанг(Китай), строб 09

Київський час



Доплерівський зсув частоти  $f_d$ , Гц      Доплерівський зсув частоти  $f_d$ , Гц

Рис. 7.3а. Старт ракети "Falcon 9" 02.03.2019 о 09:49 з космодрому Канаверал (США), строб 04



К и ї в с ь к и й ч а с

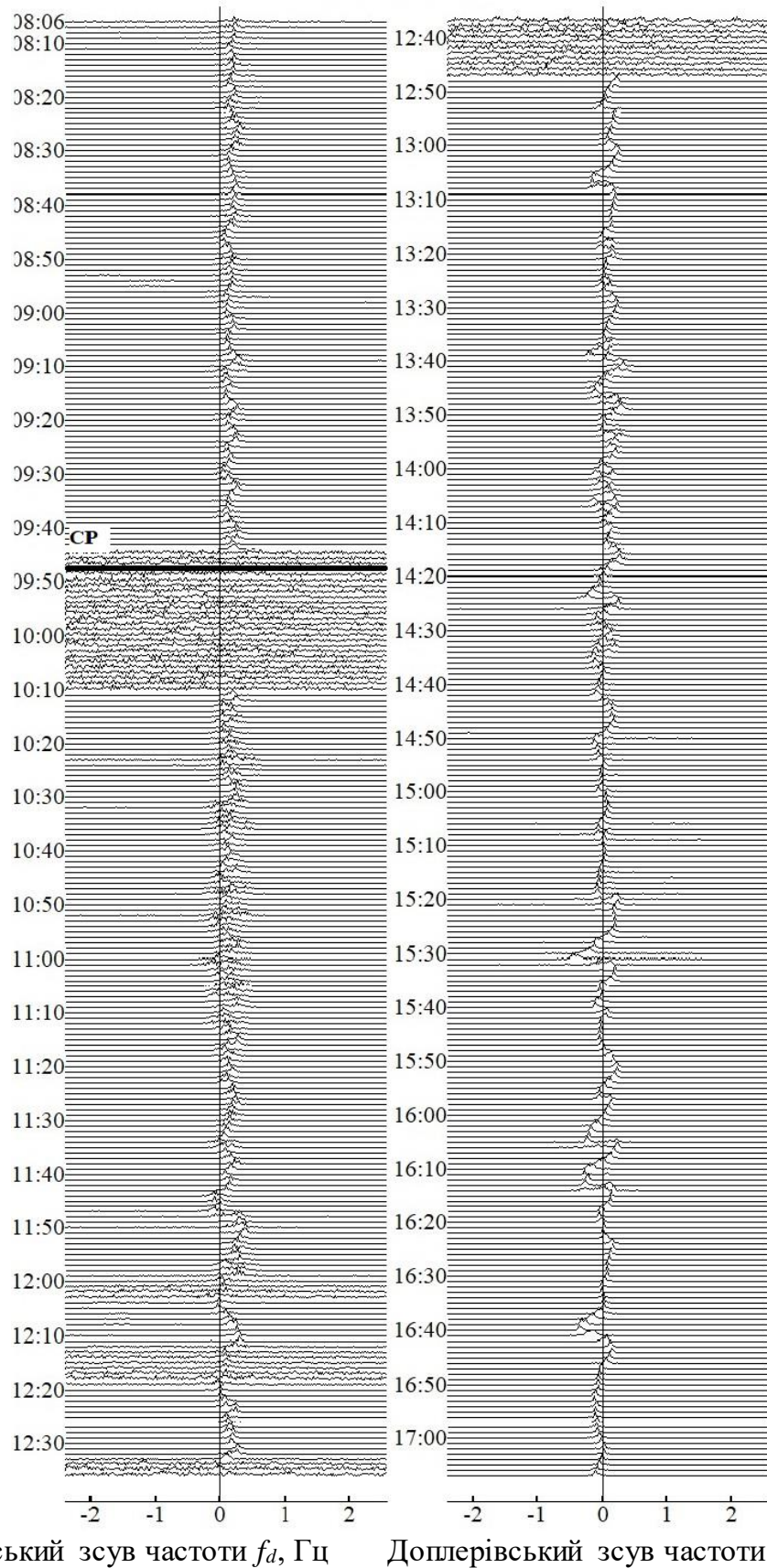
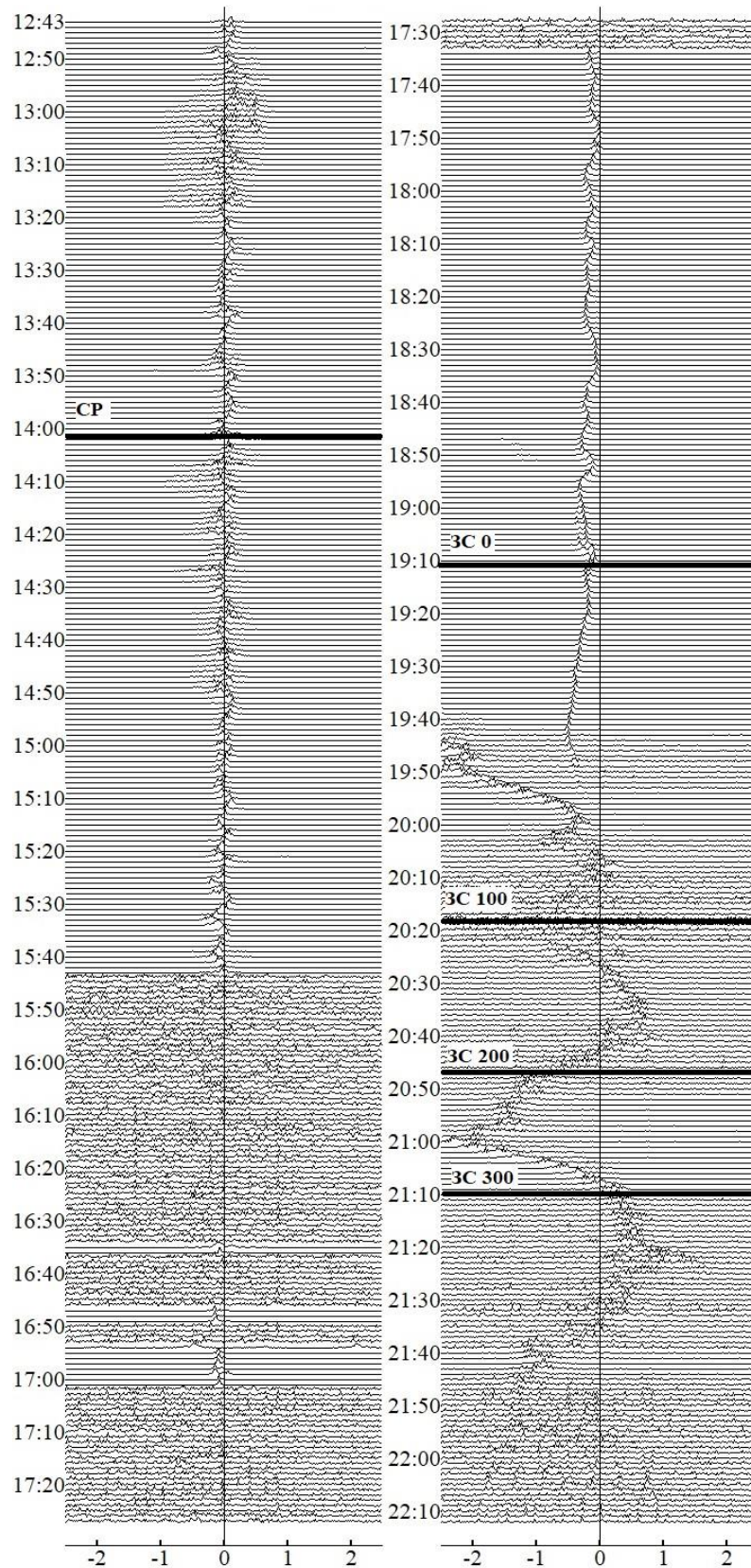
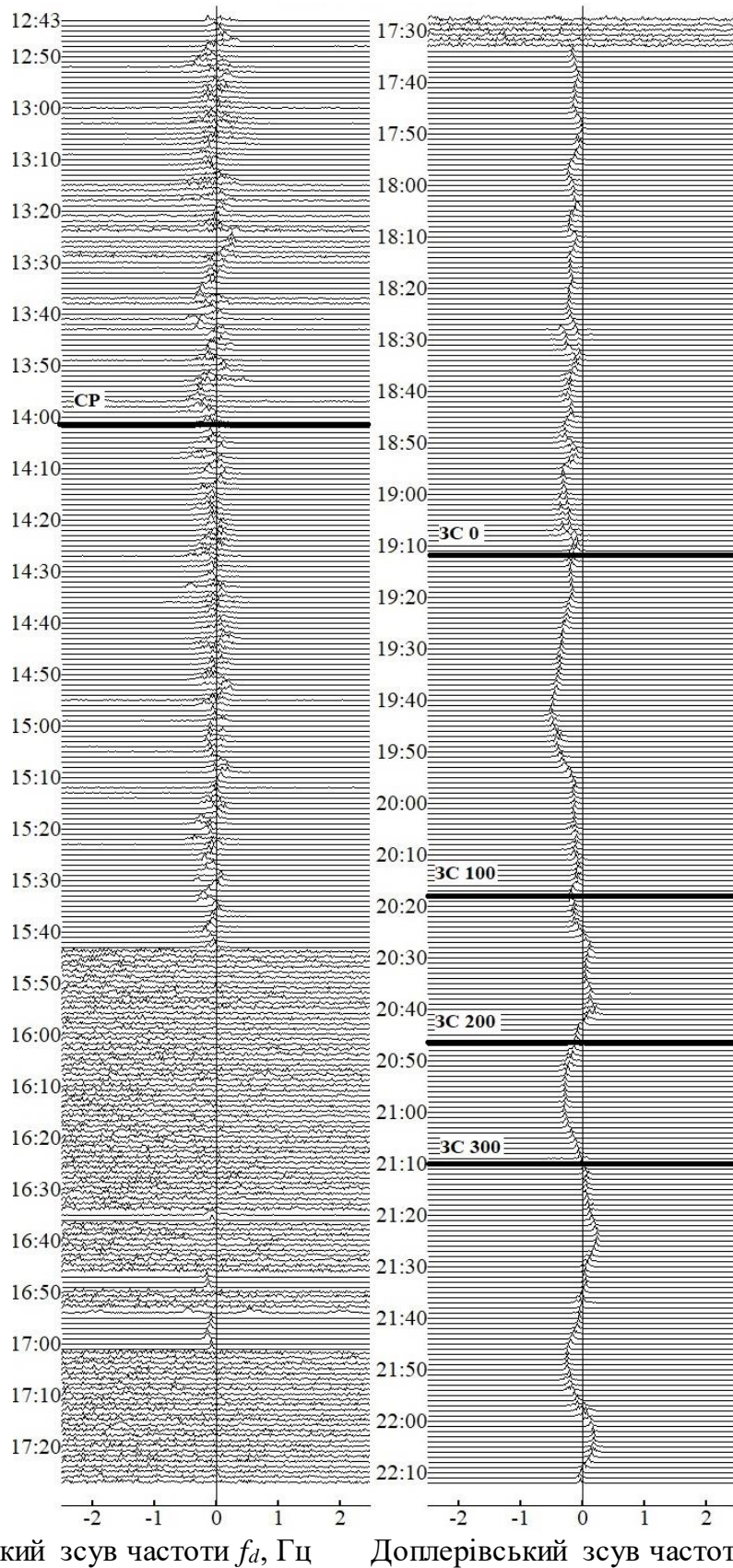


Рис. 7.36. Старт ракети "Falcon 9" 02.03.2019 о 09:49 з космодрому Канаверал (США), строб 08



Доплерівський зсув частоти  $f_d$ , Гц      Доплерівський зсув частоти  $f_d$ , Гц

Рис. 7.4а. Старт ракети "Союз 2.1.В" 04.04.2019 о 14:01 з космодрому Плесецк (Росія), строб 08



Доплерівський зсув частоти  $f_d$ , Гц      Доплерівський зсув частоти  $f_d$ , Гц

Рис. 7.4б. Старт ракети "Союз 2.1.В" 04.04.2019 о 14:01 з космодрому Плесецк (Росія), строб 09

Київський час

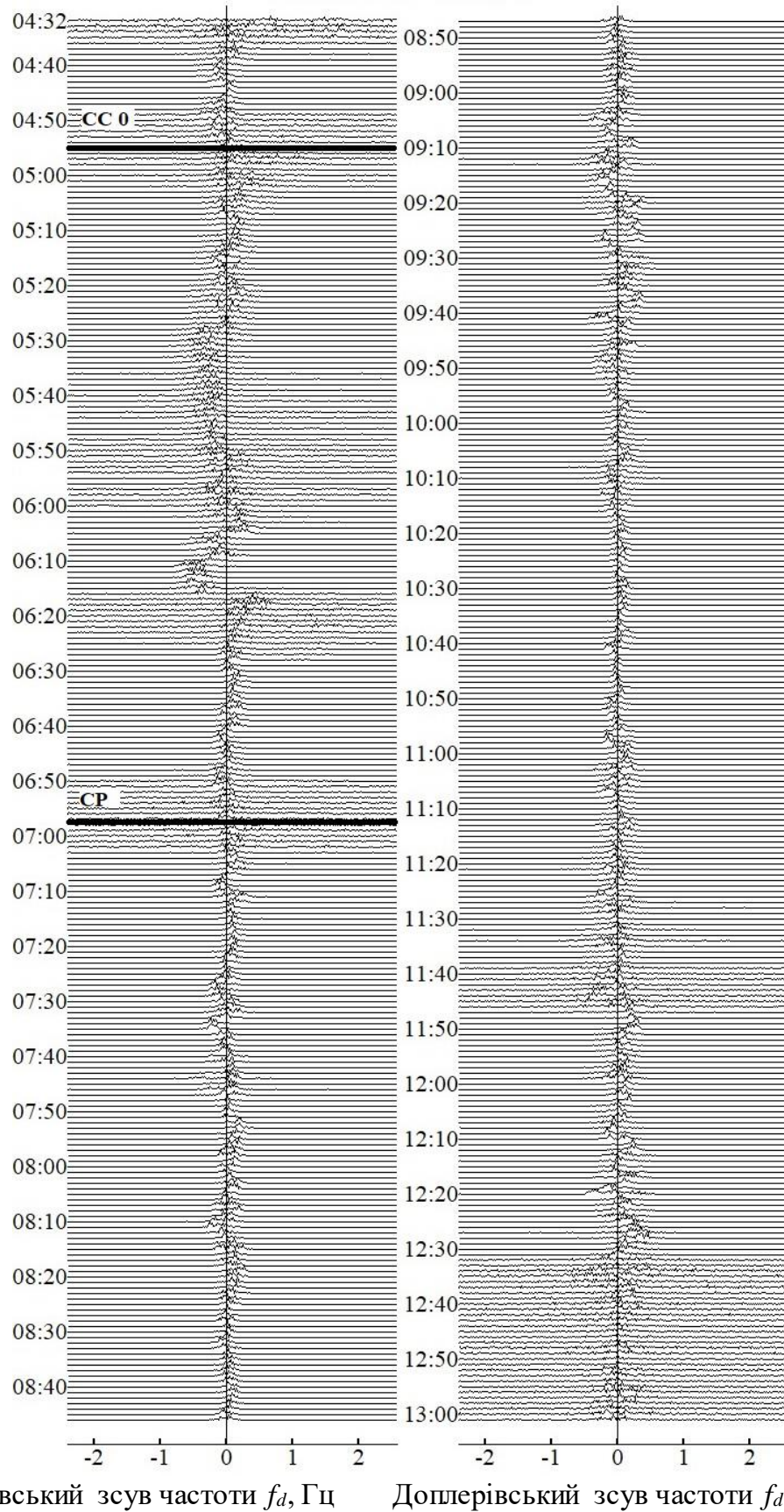
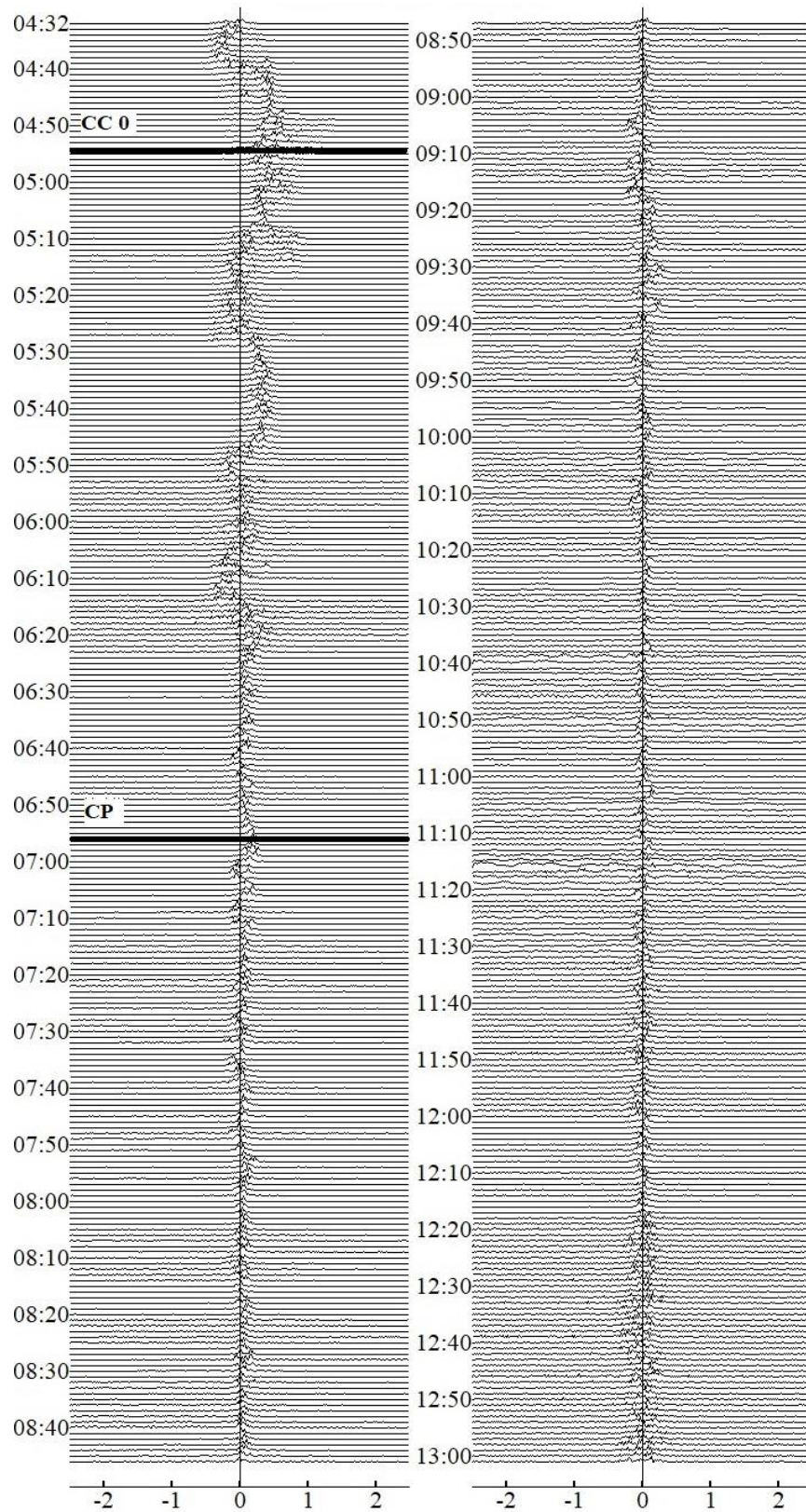


Рис. 7.5а. Старт ракети "Long March 2С" 26.07.2019 о 06:57 з космодрому Ксічанг(Китай), строб 03

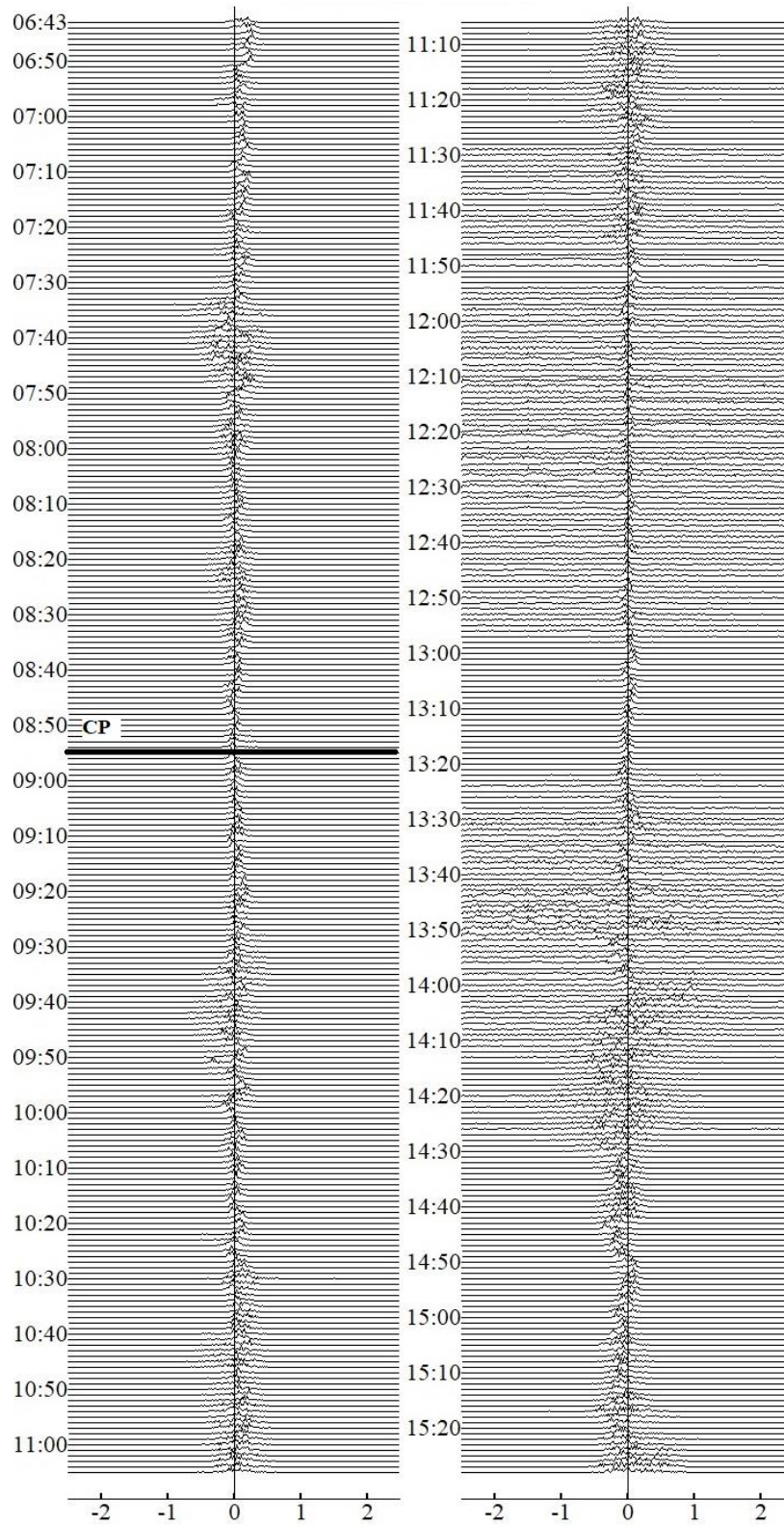
Київський час



Доплерівський зсув частоти  $f_d$ , Гц      Доплерівський зсув частоти  $f_d$ , Гц

Рис. 7.56. Старт ракети "Long March 2C" 26.07.2019 о 06:57 з космодрому Ксічанг(Китай), строб 09

К и ї в с ь к и й ч а с



Доплерівський зсув частоти  $f_d$ , Гц      Доплерівський зсув частоти  $f_d$ , Гц

Рис. 7.6а. Старт ракети "Союз 2.1.А" 30.07.2019 о 08:56 з космодрому Байконур (Росія), строб 08

К и ї в с ь к и й ч а с

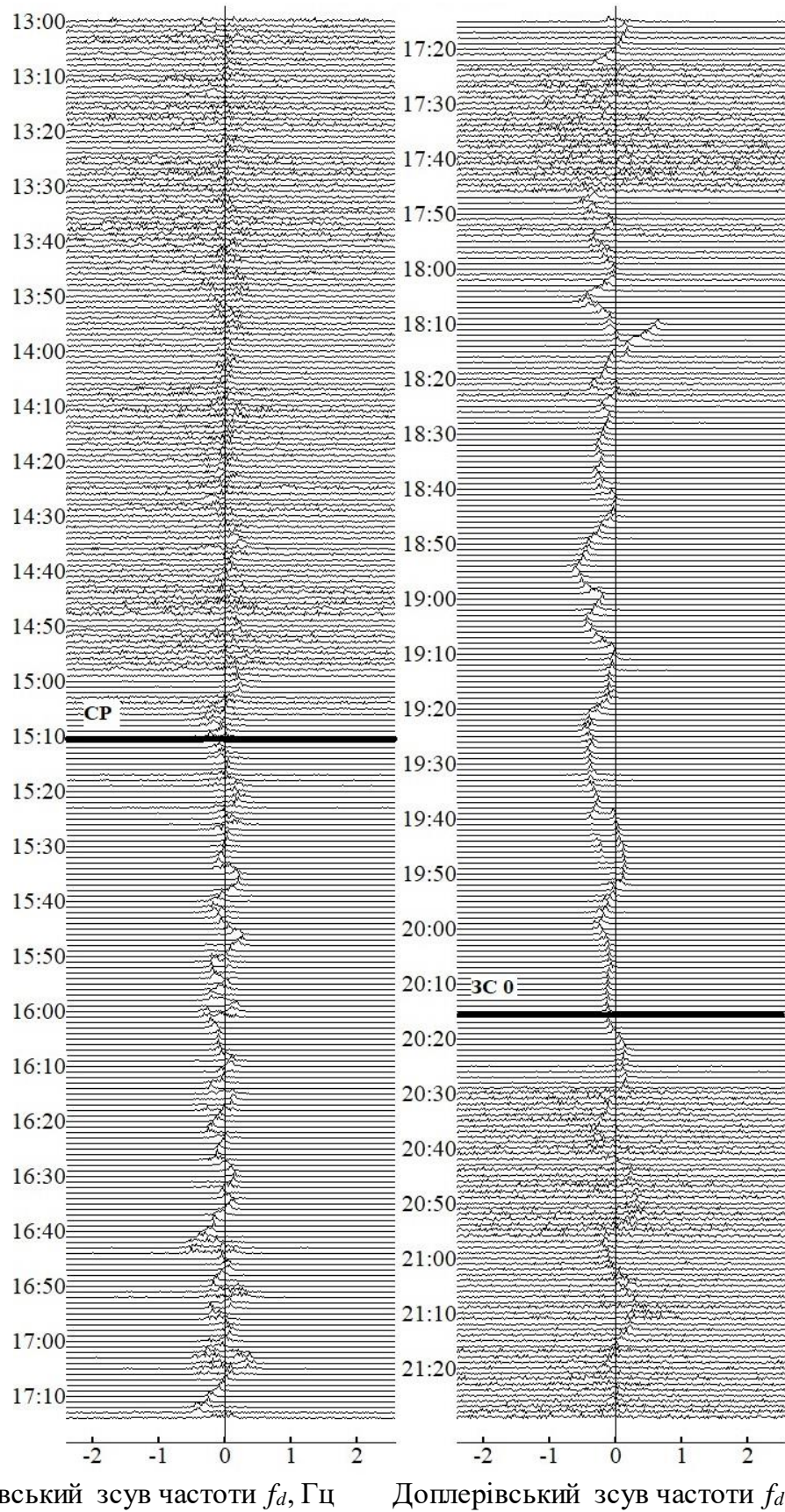


Рис. 7.7а. Старт ракети "Союз 2.1.А" 31.07.2019 о 15:10 з космодрому Байконур (Росія), строб 05

К и ї в с ь к и й ч а с

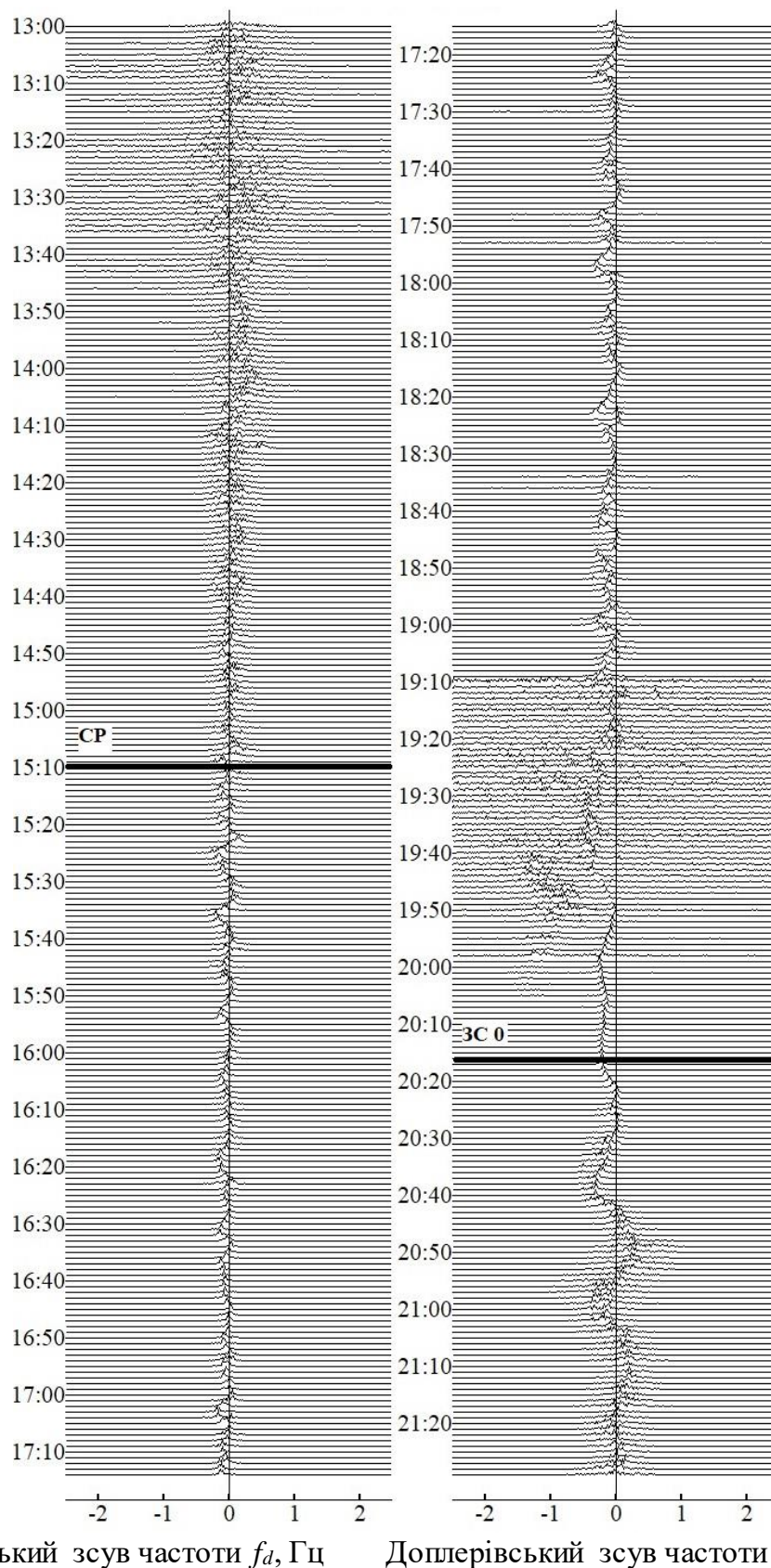


Рис. 7.76. Старт ракети "Союз 2.1.А" 31.07.2019 о 15:10 з космодрому Байконур (Росія), строб 08



Київський час

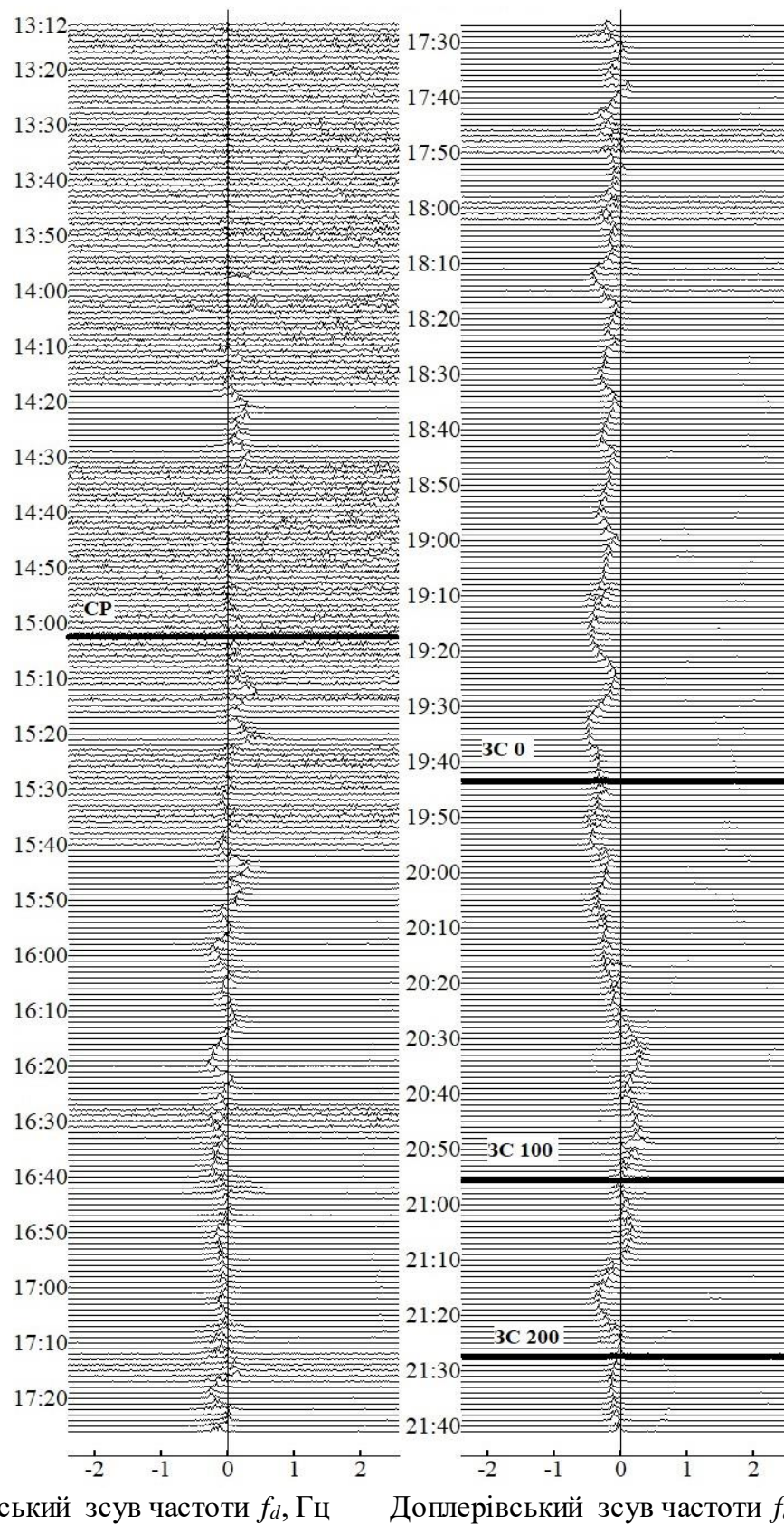


Рис. 7.8а. Старт ракети "Long March 3В" 19.08.2019 о 15:03 з космодрому Ксічанг(Китай), строб 04

Київський час

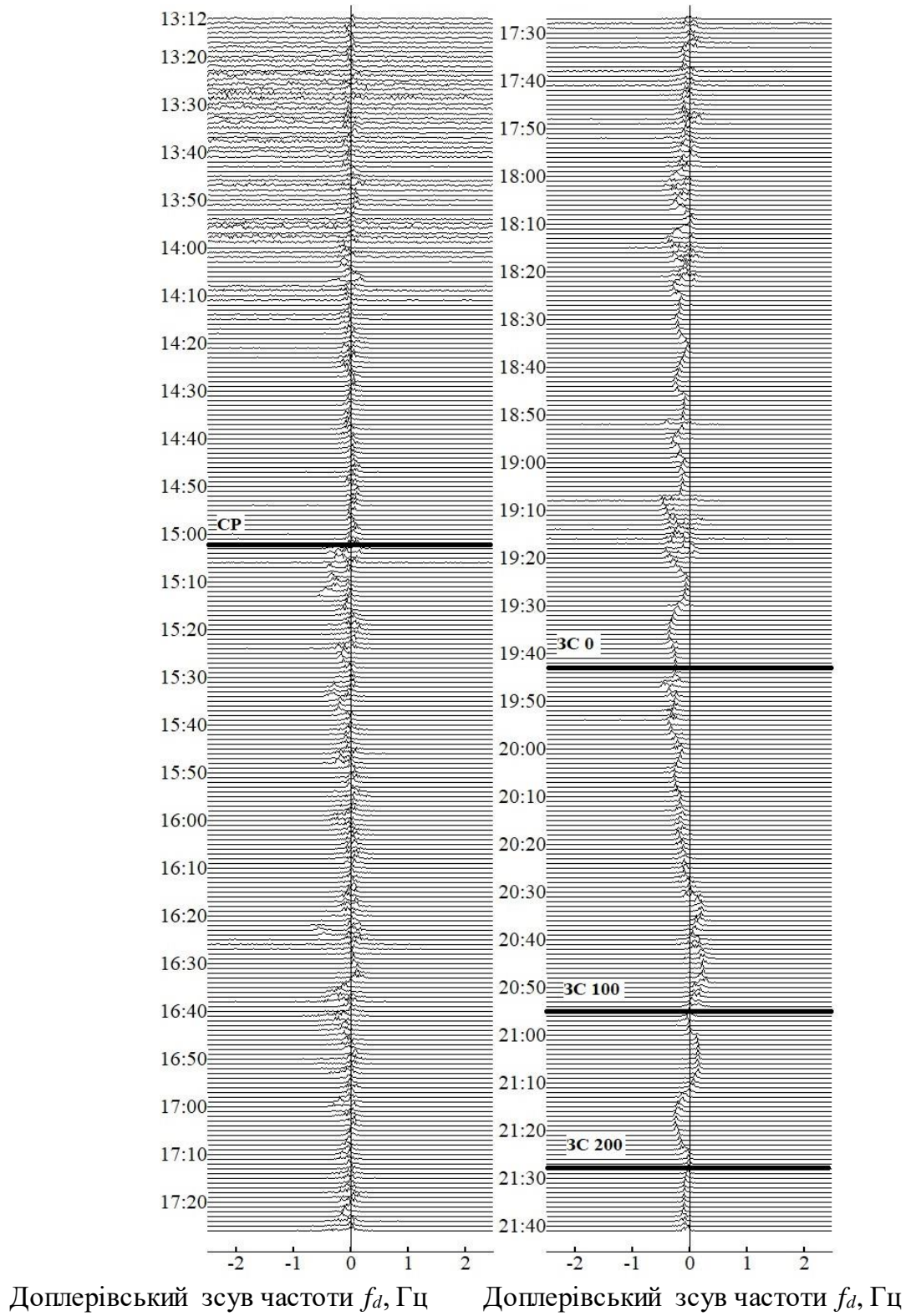
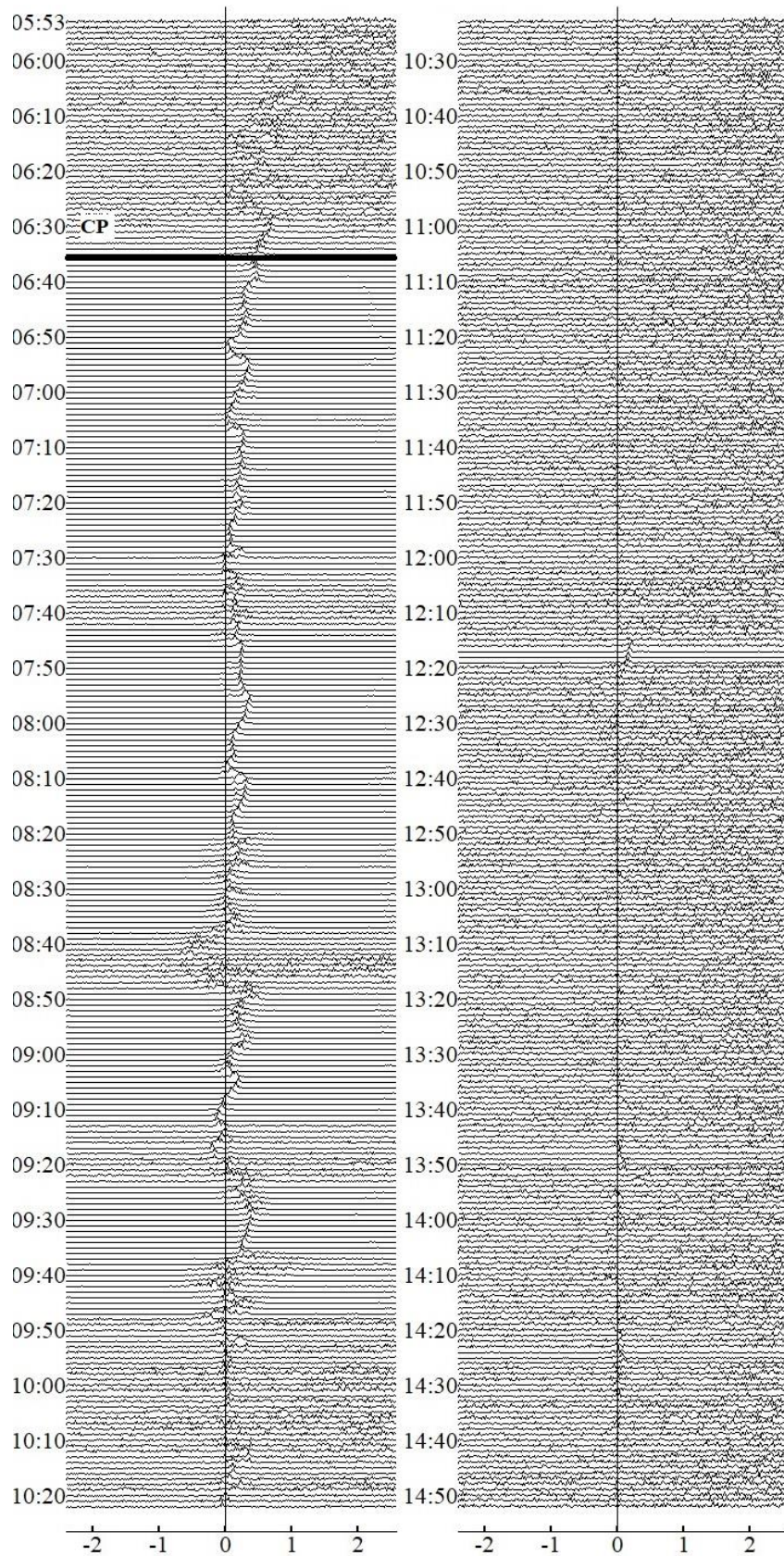


Рис. 7.86. Старт ракети "Long March 3В" 19.08.2019 о 15:03 з космодрому Ксічанг(Китай), строб 09

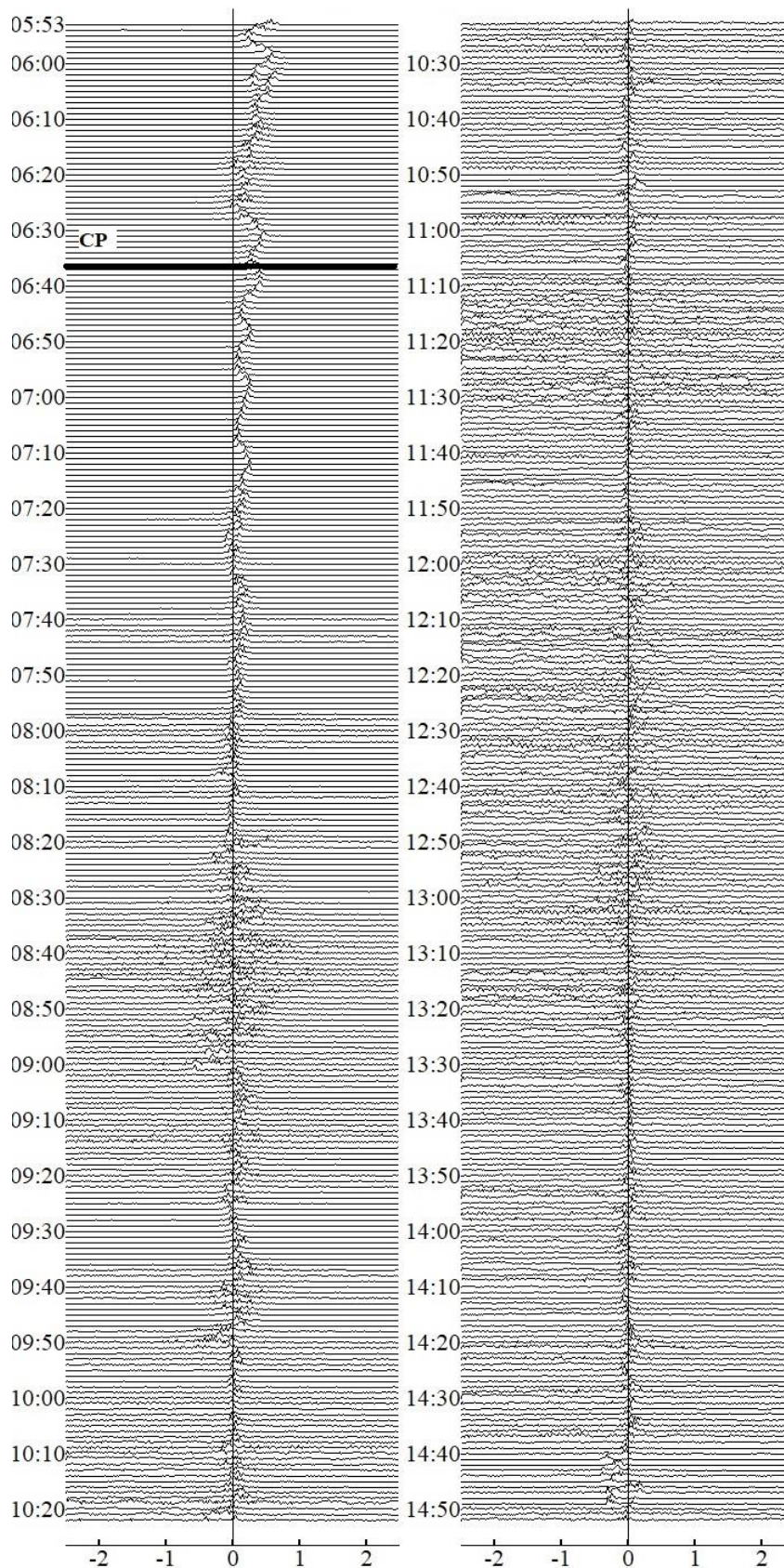
Київський час



Доплерівський зсув частоти  $f_d$ , Гц      Доплерівський зсув частоти  $f_d$ , Гц

Рис. 7.9а. Старт ракети "Союз 2.1.А" 22.08.2019 о 06:38 з космодрому Байконур (Росія), строб 04

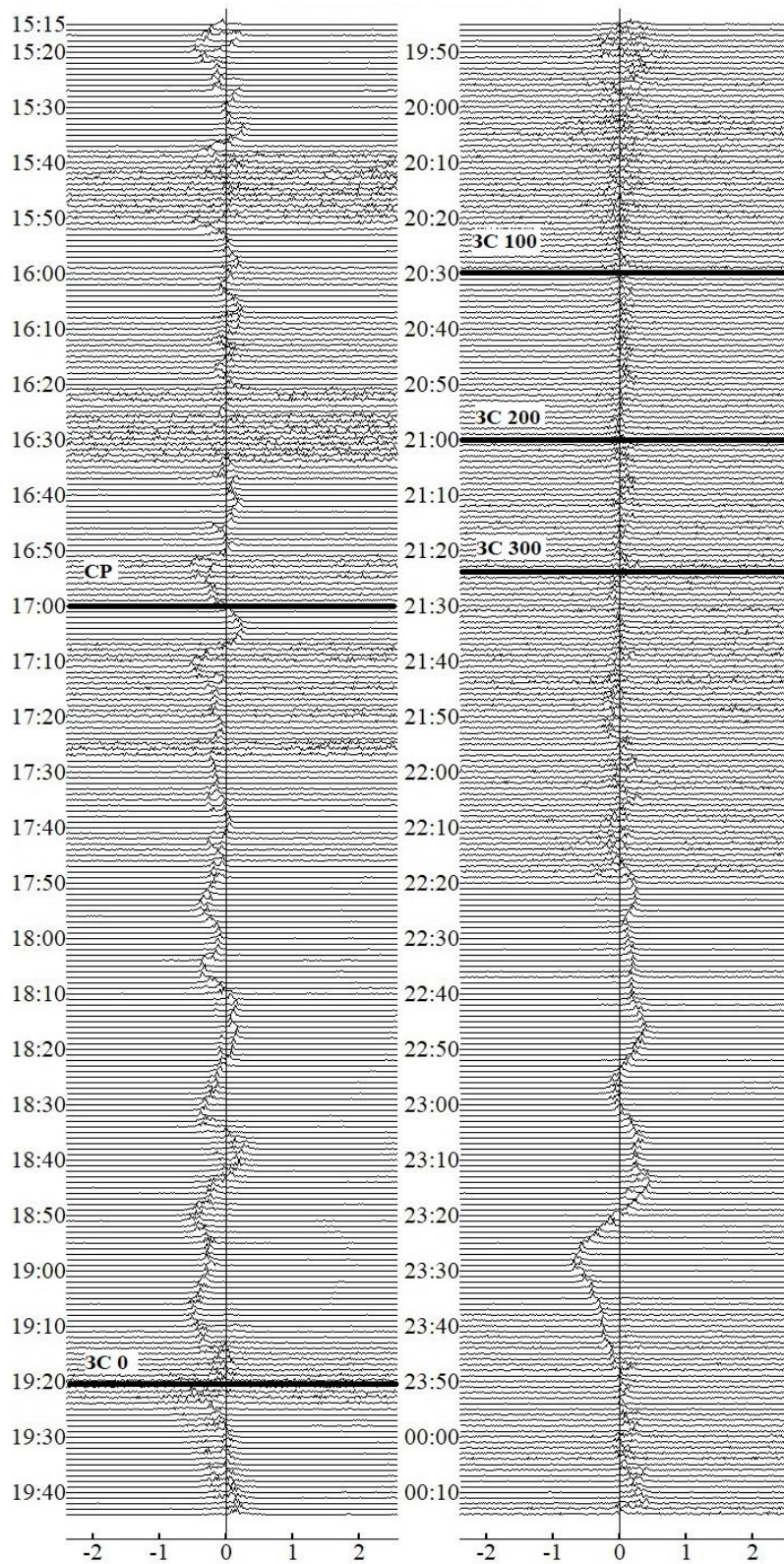
Київський час



Доплерівський зсув частоти  $f_d$ , Гц      Доплерівський зсув частоти  $f_d$ , Гц

Рис. 7.96. Старт ракети "Союз 2.1.А" 22.08.2019 о 06:38 з космодрому Байконур (Росія), строб 09

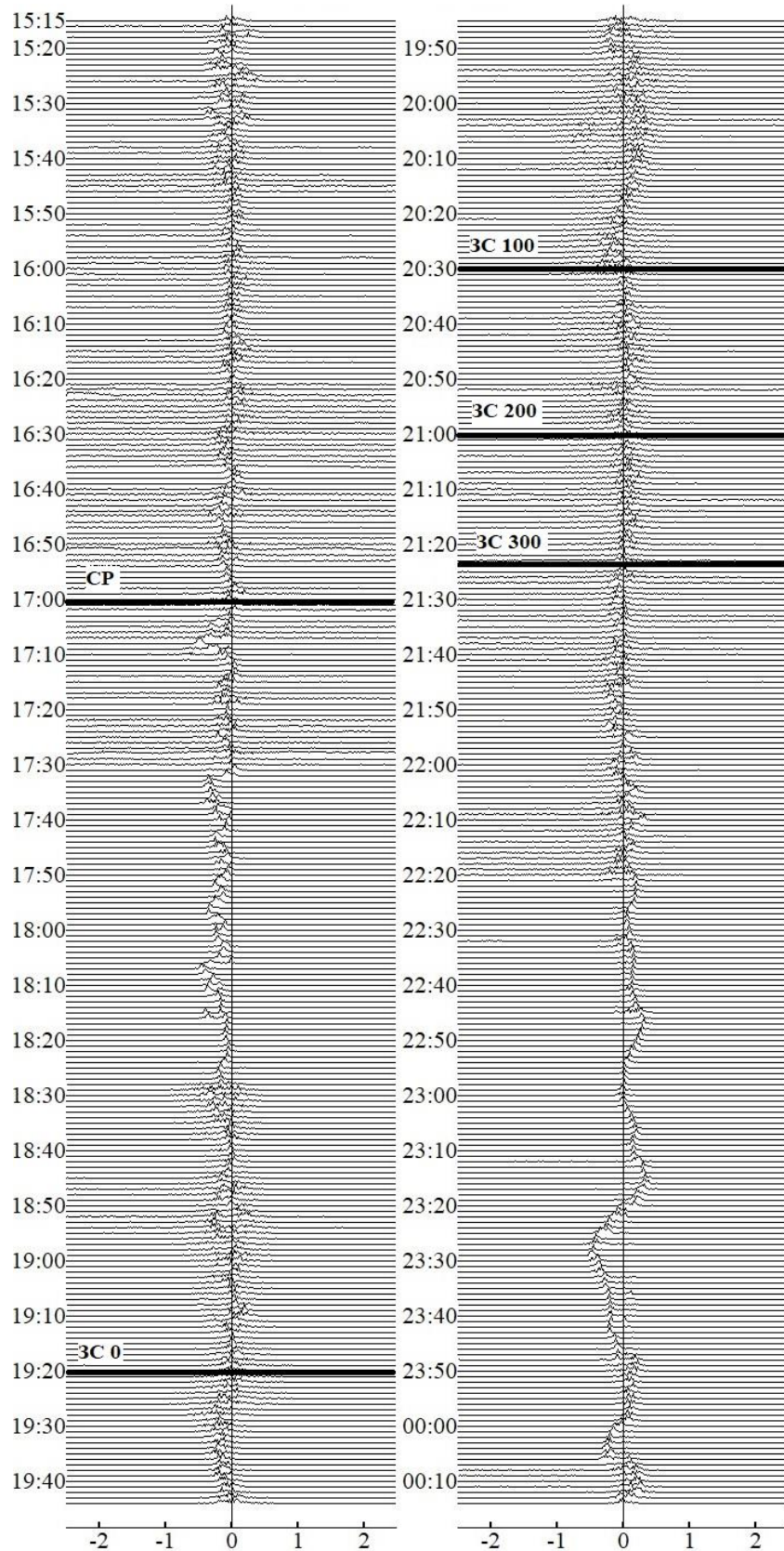
Київський час



Доплерівський зсув частоти  $f_d$ , Гц      Доплерівський зсув частоти  $f_d$ , Гц

Рис. 7.10а. Старт ракети "Roskot" 30.08.2019 о 17:00 з космодрому Плесецк (Росія), строб 04

Київський час



Доплерівський зсув частоти  $f_d$ , Гц      Доплерівський зсув частоти  $f_d$ , Гц

Рис. 7.10б. Старт ракети "Roskot" 30.08.2019 о 17:00 з космодрому Плесецк (Росія), строб 09