

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**Харківський національний університет
імені В. Н. Каразіна
Факультет радіофізики, біомедичної електроніки
та комп'ютерних систем**

"ДО ЗАХИСТУ"
Завідувач кафедри
космічної радіофізики
професор
Леонід ЧОРНОГОР
“ _ ” _____ 2022 р.

**ДИПЛОМНА РОБОТА МАГІСТРА
ЗІ СПЕЦІАЛЬНОСТІ «ПРИКЛАДНА ФІЗИКА ТА НАНОМАТЕРІАЛИ»**

**ДОПЛЕРІВСЬКЕ РАДІОЗОНДУВАННЯ
ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ІОНОСФЕРІ**

Керівник
доктор фіз.-мат. наук,
професор

Леонід ЧОРНОГОР

Студент групи РР - 66

Владислав ФЕДОСЕНКО

Харків 2022

УДК: 550.388.2; 551.510.535

Реферат

В.О. Федосенко. Доплерівське радіозондування динамічних процесів у іоносфері. Кваліфікаційна робота магістра по радіофізиці та електроніці. Харків, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, факультет радіофізики, біомедичної електроніки та комп'ютерних систем, кафедра космічної радіофізики, 27 рис., 2 табл., 48 сторінок, 9 посилань.

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

Оброблено та інтерпретовано варіації доплерівських спектрів, супроводжують проходження сонячного термінатору, старту ракет з космодромів США, Росії та Франції.

UDK: 550.388.2; 551.510.535

Abstract

V.O. Fedosenko. The Doppler radiosounding disturbances ionosphere plasma. M.S. in Radio Physics and Electronics Thesis, Department of Space Radio Physics, Kharkiv V. Karazin National University, Kharkiv, 2007, 48 Pages, 27 Figures, 2 Table, 9 References.

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

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

ЗМІСТ

1. ВСТУП	4
2. МЕТОД ДОПЛЕРІВСЬКОГО РАДІОЗОНДУВАННЯ	4
2.1. Теоретичні основи методу	4
2.2. Радар доплерівського зондування іоносфери	6
2.3. Висновки	8
3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ЗБУРЕНІЙ ІОНОСФЕРІ	9
3.1. Використовувані методи обробки	9
3.3. Загальні відомості про масив експериментальних даних	13
3.3. Фізичні процеси, що супроводжували старти ракет	16
4. ВИСНОВКИ	22
5. СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	23
6. ДОДАТОК 1	24

1. ВСТУП

Іоносфера в якості підсистеми входить в систему Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера – міжпланетне середовище – Сонце. "Знизу" і "зверху" в неї надходять потоки речовини, енергії і випромінювань різної природи як природної, так і штучної. В результаті цих впливів в цілому і в середній іоносфері (висоти $z \sim 100 - 300$ км) зокрема виникають нестационарні процеси з характерними часом від одиниць секунд до 11 років і більше, деякі з них розглянуті в даній роботі.

В даний час актуальними є проблеми взаємодії областей навколоземного космічного простору і космічної погоди. В рамках першої з них ведуться дослідження процесів як в природно-, так і в штучно-обурених умовах. Штучні джерела цих збурень виявляються зручними тому, що вдається дозувати величину енерговиділення, задавати його час і місце. В цьому випадку точно задається місце, час і величина енерговиділення. Джерелами енерговиділення в активних експериментах виступають потужне випромінювання, хімічні та ядерні вибухи, інжекція частинок з плазми та ін. У даній роботі в якості такого використовуються старті потужних ракет, що мають місце в різних точках земної кулі і віддалених від місця спостереження (Радіофізична обсерваторія ХНУ імені В. Н.Каразіна, поблизу м. Харкова) на величину від 1500 до 10000 км. Оскільки реакція середовища на старті космічних апаратів маскується збуреннями природної природи, то виникає необхідність дослідження фону на якому спостерігається реакція на старті. Найбільш значними джерелами природних збурень є нестационарні процеси на сонці і їх наслідок магнітні бурі, а також сонячні термінатори.

Метою даної роботи є виклад та інтерпретація результатів експериментів з дослідження іоносферної плазми, збуреної джерелами природної та антропогенної природи.

Робота складається із вступу, трьох розділів та висновку. У другому розділі викладені результати аналітичного огляду. У четвертому-викладені і інтерпретовані результати експериментів, проведених в радіофізичній обсерваторії ХНУ імені В. Н.Каразіна в 2020 – 2021 рр. в основному увага зосереджувалася на пошуку ефектів в іоносфері, викликаних стартами ракет і сонячним термінатором.

У висновку описані явні результати досліджень.

2. МЕТОД ДОПЛЕРІВСЬКОГО РАДІОЗОНДУВАННЯ

2.1. Теоретичні основи методу

Метод доплерівського зондування заснований на вимірюванні та аналізі зміщення частоти f_d відбиваються радіохвиль, викликаного нестационарними процесами в середній іоносфері ($z = 100 - 300$ км). Доплерівське зміщення частоти (ДЗЧ) може бути обумовлено: змінами властивостей середовища вздовж траєкторії (наприклад, зміна електронної концентрації), змінами геометричного шляху хвилі (наприклад, в результаті зміщення рівня відображення). Нижче $z = 100$ км метод не чутливий до змін у середовищі через малу концентрацію електронів. Середовище практично не

дає внеску в ефект Доплера, так як на цих висотах показник заломлення середовища мало відрізняється від одиниці. Зовнішню іоносферу не вдається досліджувати даним методом через відсутність відбитих від неї сигналів.

При $f < f_k$ (f_k – критична частота іоносфери) відбиті сигнали приймаються приймачем і обробляється в доплерівській приставці, де шляхом порівняння частот високостабільного випромінюваного f_0 і прийнятого f сигналів виділяється різницева частота[1]

$f_d = f - f_0.$	(2.1.1)
------------------	---------

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

Як відомо, доплерівське зміщення частоти Δf при поширенні радіохвиль викликається зміною в часі фазового шляху P [2]:

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

де c – швидкість світла у вакуумі.

У найпростішому випадку, якщо не враховувати вплив геомагнітного поля, зіткнення частинок і кривизну іоносфери, із загального виразу (2.1.1) можуть бути отримані вирази для різних окремих випадків.

Розглянемо випадок для вертикального поширення при малих змінах електронної концентрації в не відхиляючій області ($n \approx 1$) і швидкості її зміни $\frac{\partial N}{\partial t}$, що залежить від z . Як відомо, зміна фазового шляху

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

де n – дійсна частина показника заломлення [3],

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

де $N_T = \int_0^{z_0} N(z, t) dz$ – повний вміст електронів в стовпі, e и m – заряд і маса електрона, z_0 – висота відбиття хвилі. У цьому випадку спостережувані доплерівські зміщення виявляються обернено пропорційні робочій частоті.

Якщо ж варіації частоти обумовлені малими змінами висоти відображення z_0 при збереженні форми шару, то f_d стає пропорційно робочій частоті [4]

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

де v – швидкість руху області відбиття.

У загальному випадку в іоносфері одночасно відбуваються зміни обох типів, і залежність f_d від f може мати більш складний характер.

У методі ДЗ зазвичай мінімальне значення доплерівського зміщення частоти $f_{d \min} \approx 0,01 - 10$ Гц. Таке значення не є граничним. Потенційна точність вимірювання f_d обмежена похибкою, для якої при деяких спрощуючих припущеннях, використовуючи загальні положення зі статистичної теорії оцінки параметрів сигналу, отримано наступне співвідношення [5]:

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

де T_d – інтервал часу, на якому здійснюється спектральне оцінювання.

Потенційна чутливість методу ДЗ виявлення ХЗ становить:

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

де L_N – протяжність області висот, що дає основний внесок в доплерівський ефект; $\lambda = c/f$. Наприклад 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 приблизно 1 хв), відносна нестабільність частоти не гірше 10^{-11} .

Зрозуміло, похибка Δf_{dp} не має сенсу зводити до значень набагато меншим величини роздільної здатності по частоті δf_d , властивою доплерівському оцінювання. Без застосування методів, що дозволяють отримати сверхразрешение, $\delta f_d = 1/T_d$. При цьому похибка оцінки f_d становить близько $\delta f_d / 2$. Так при $T_d = 51,2$ маємо $\delta f_d = 2 \cdot 10^{-2}$ Гц. Для досягнення $\delta f_d \approx 10^{-4} - 10^{-5}$ Гц інтервал T_d необхідно збільшити до $10^4 - 10^5$ с відповідно. При цьому має виконуватися очевидна нерівність $T \gg T_d$ або, принаймні, $T \geq 2T_d$ (наслідок теореми Котельникова). Тому при $T \approx 600$ 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 $\delta N_{\min} \approx 0,05 \%$.

2.2 Радар доплерівського зондування іоносфери

Радар, призначений для доплерівського зондування (ДЗ) іоносфери, розташований поблизу м. Харкова [7]. Основні параметри радару, який випромінює радіоімпульси вертикально вгору, наступні: діапазон частот $f = 1-24$ МГц, імпульсна потужність радіопередавального пристрою – 1 кВт, тривалість імпульсу $\tau \approx 500$ мкс, частота повторення імпульсів – 100 Гц, смуга пропускання фільтру радіоприймального пристрою – 10 Гц. Антенна система являє собою вертикальний ромб з коефіцієнтом підсилення $G \approx 1-10$ в залежності від частоти хвилі. Відношення сигнал/завада q досягає 10^5-10^6 в нічний час і 10^3-10^4 у денний час доби. Радар пов'язаний з персональним комп'ютером, утворюючи програмно-апаратний комплекс, який проводить вимірювання та попередню обробку сигналу в реальному масштабі часу. Висотна протяжність відбитого сигналу істотно перевищує $c \cdot \tau / 2 \approx 75$ км. Тому використовується стробування за висотою з дискретністю $\Delta z = 75$ км у діапазоні діючих висот 75–450 км. Сигнал биття коливань опорного генератора та відбитого сигналу в цифровому вигляді (частота опитування – 10 Гц) записувався на носій інформації, а потім за допомогою перетворення Фур'є обчислювалися доплерівські спектри в діапазоні можливих доплерівських зміщень від $-2,5$ до $+2,5$ Гц на інтервалі часу 60 с (розрізнення

за частотою ~ 17 МГц). Похибка оцінки доплерівського зміщення частоти (ДЗЧ) f_d становить $\sim 10^{-3}$ Гц при типовому значенні q .

Функціональна схема доплерівського ВЧ радару та його структурна блок-схема наведені на рис.2.1. та 2.2.

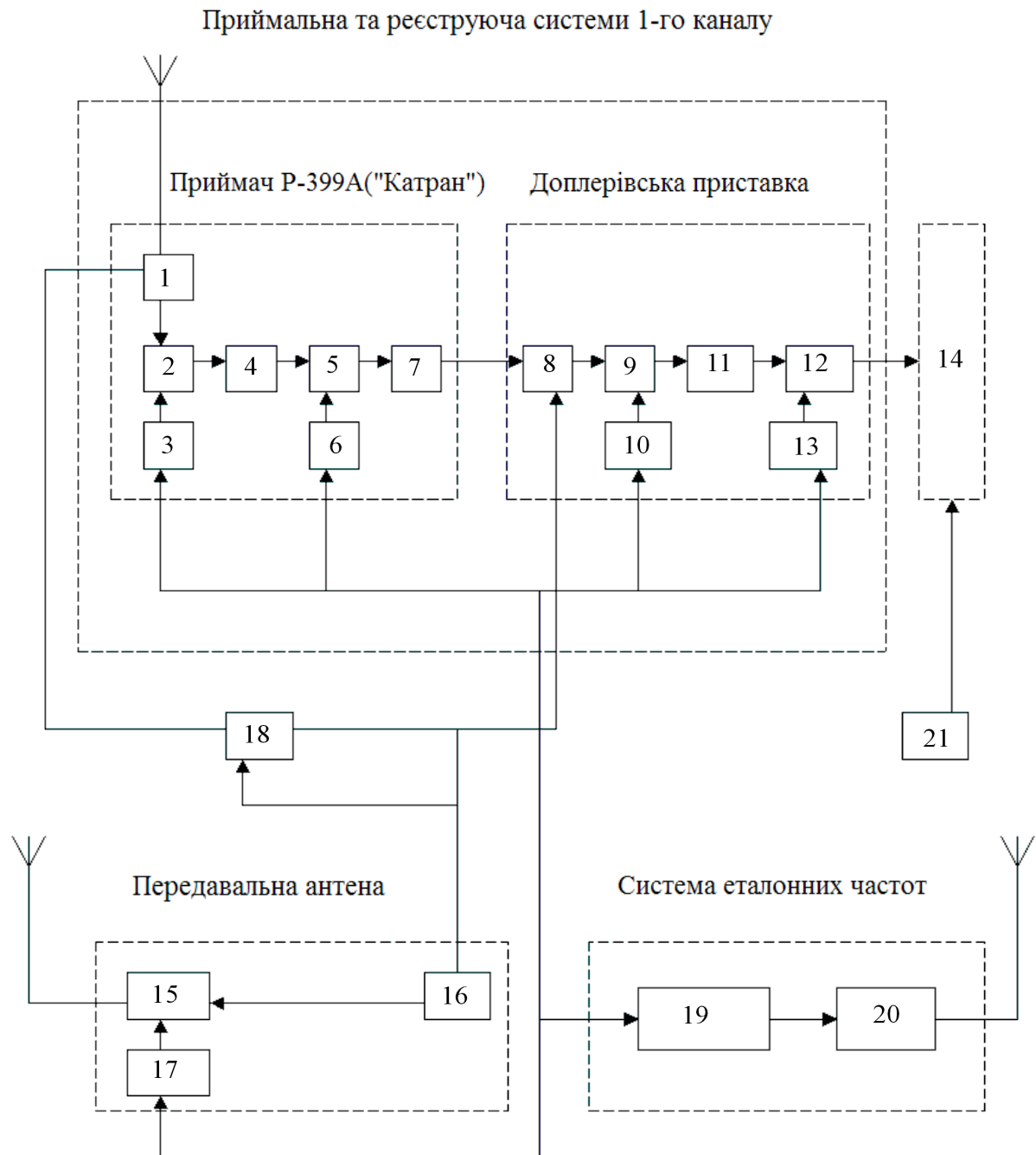


Рис.2.1. Функціональна схема доплерівського радару: 1 – підсилювач високої частоти (ПВЧ); 2 – перший змішувач; 3 – перший гетеродин; 4 – перший підсилювач проміжної частоти (ППЧ-1); 5 – другий змішувач; 6 – другий гетеродин; 7 – ППЧ-2; 8 – комутатор; 9 – перший балансний змішувач; 10 – опорний генератор 214 кГц; 11 – вузькосмуговий фільтр (Гц) низької (кГц) частоти (ФНЧ); 12 – другий балансний змішувач; 13 – опорний генератор 1 кГц +; 14 – реєструючий пристрій; 15 – передавач; 16 – модулятор; 17 – синтезатор частоти; 18 – схема замикання; 19 – еталонний генератор; 20 – приймач компаратор; 21 – система міток часу.

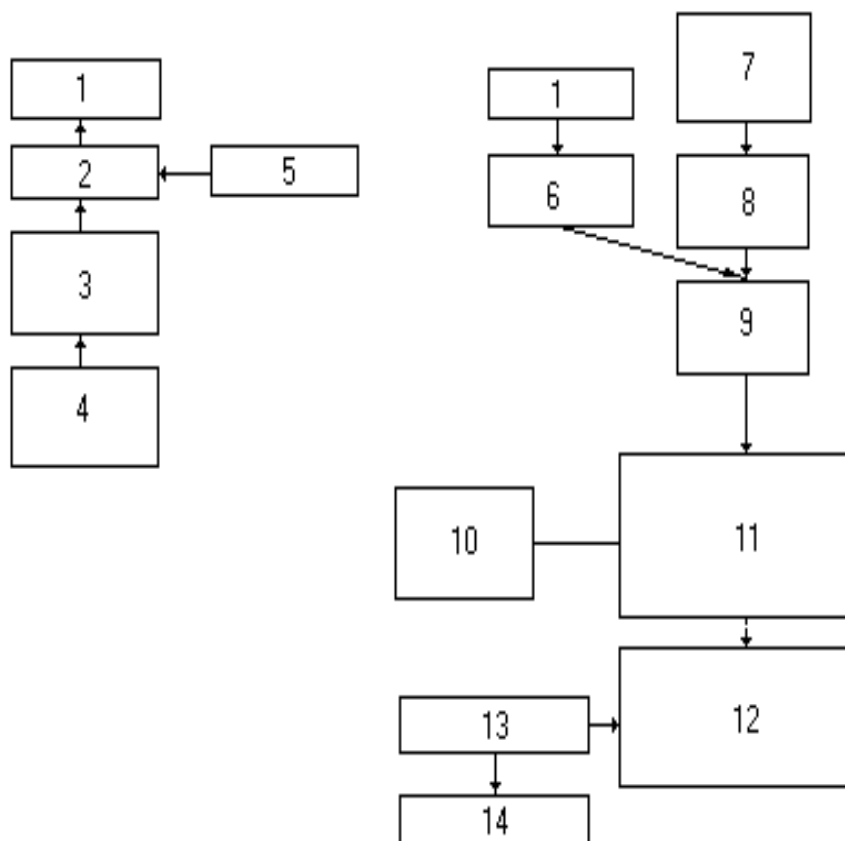


Рис. 2.2. Блок-схема експериментального устаткування спостереження доплерівського зміщення частоти: 1 – антена; 2 – передавач; 3 – синтезатор частоти; 4 – стандарт частоти; 5 – ідентифікатор; 6 – приймач сигналу; 7 – опорний генератор; 8 – приймач опорного сигналу; 9 – балансний змішувач; 10 – генератор міток часу; 11 – магнітофон см малою швидкістю руху стрічки; 12 – магнітофон із високою швидкістю руху стрічки; 13 – спектроаналізатор; 14 – графік $f_d(t)$.

2.3. Висновки

1. Метод ДЗ заснований на ефекті Доплера, який полягає в зміні частоти хвилі в результаті руху приймача (передавача) або варіації параметрів. Апаратура, що використовує цю методику дозволяє вимірювати доплерівську частоту f_d з точністю до 0,01 Гц. У найпростішому випадку, якщо не враховувати вплив геомагнітного поля, зіткнення частинок і кривизну іоносфери, для випадку вертикального поширення. Зміни f_d можуть бути обумовлені змінами електронної концентрації або зміною висоти відбиття.

У загальному випадку в іоносфері одночасно відбуваються зміни обох типів, і залежність f_d від f може мати більш складний характер.

2. Комплекс вертикального доплерівського радіозондування, розташований в РФО. У комплексі реалізований принцип одночасного випромінювання, прийому і обробки зондуючих сигналів на двох

когерентних частотах. Комплекс складається з двоканальної радіопередавальної системи, двох передавальних антен, систем управління, обробки та реєстрації.

3. За останні кілька десятиріч вивчення іоносфери методика вимірювань і обробки істотно змінилася: від вивчення параметрів на 1-2 частотах в доплерівських радарх до 40 в цифрових іонозондах. Останні дають можливість отримання основних іоносферних параметрів одночасно на всіх висотах з кроком від 10 до 180 км.

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ЗБУРЕНІЙ ІОНОСФЕРІ

3.1. Використовувані методи обробки

У даній роботі використовувалися наступні методи обробки: безперервне, віконне, вейвлет і адаптивне перетворення Фур'є. Розглянемо докладніше безперервне перетворення Фур'є [8].

Традиційне неперервне перетворення Фур'є, яке вже багато років широко використовують у різних галузях науки і техніки, як відомо, має вигляд:

$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt,$	(3.1.1)
--	---------

де $f(t)$ – аналізований сигнал, $F(t)$ – функція спектральної густини (ФСГ) одновимірного перетворення Фур'є, $\varphi_{\omega}(t) = e^{i\omega t}$ – базові функції одновимірного перетворення Фур'є. Пряме перетворення Фур'є у такому вигляді дозволяє отримати в аналітичному вигляді функцію частоти $F(t)$ від тимчасової функції $f(t)$. Оскільки ми виходимо з припущення, що $f(t)$ в загальному випадку не періодична функція, то вже не можна говорити про окремі гармоніки і дискретний спектр сигналу. Спектр $F(t)$ стає безперервним і можна говорити лише про щільність енергії сигналу в деякій малій (що прагне до нуля) смузі частот. Тож у разі $F(t)$ є залежність щільності сигналу від частоти.

Відповідно, зворотне перетворення Фур'є задається так:

$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega)e^{-i\omega t} d\omega.$	(3.1.2)
--	---------

Основним недоліком такого виду перетворення Фур'є є повна відсутність в ФСГ $F(t)$ інформації про положення відповідних частотних складових на тимчасовій осі. Аналогічно функція $f(t)$ не містить інформації про частотні характеристики сигналу, що вивчається. Тому наступним кроком у розвитку ідеї перетворення Фур'є була поява віконного перетворення Фур'є (ВПФ).

Перейдемо до розгляду віконного перетворення Фур'є [8].

Часовий інтервал існування сигналу розбивається на ряд проміжків – тимчасових вікон. У кожному вікні обчислюється своє перетворення Фур'є.

Якщо в якомусь вікні існували частотні складові деякого сигналу, то вони будуть присутні в спектрі. Таким чином можна перейти до частотно-часового представлення сигналів. Це перетворення описується за допомогою формули:

$Sf(\omega, t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)g(t - \tau)e^{-i\omega\tau} d\tau,$	(3.1.3)
--	---------

де $g(t)$ – дійсна віконна функція, що володіє властивістю локалізованості уздовж осі часу t ; τ – параметр, що описує зміщення віконної функції щодо сигналу уздовж тимчасової осі. Для кожного вікна ми отримуємо свій набір комплексних амплітуд сигналу в частотній області. Розкладання проводиться по базису від відомих "атомів Габора" [8]:

$\varphi_{\omega,t}(t) = g(t - \tau)e^{-i\omega\tau}.$	(3.1.4)
--	---------

В результаті ФСТГ ВПФ $Sf(\omega, \tau)$ одночасно несе інформацію як про тимчасові, так і про частотні властивості аналізованого сигналу $f(t)$. Однак не все так просто. Вибираючи вікно з малою шириною за часом, ми отримуємо високе часове розширення, але низьке частотне, і навпаки. Віконне перетворення оперує з квадратними вікнами, тому дане протиріччя для нього є нерозв'язним.

Залежність густини енергії від часу і частоти (або періоду) для ВПФ називається спектрограмою:

$$P_s f(\omega, \tau) = |Sf(\omega, \tau)|^2.$$

Разом з тим, ВПФ має той недолік, що при постійному часовому розрізненні, яке задається шириною віконної функції $g(t)$, розрізнення за частотою виявляється однаковим для всіх частотних компонент сигналу. Цей недолік виявився подоланим в з'явився в кінці ХХ століття вейвлет-перетворення (ВП), що володіє адаптивними властивостями.

Розглянемо вейвлет-перетворення.

Безперервне ВП функції $f(t)$ задається наступним чином: [8].

$Wf(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt,$	(3.1.5)
--	---------

де символом $*$ позначається комплексне сполучення, а розкладання проводиться по базису вейвлетів

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right),$$

в якому a – параметр масштабування ($a > 0$), b – параметр зсуву. Базиси на основі речових вейвлетів, зокрема, зручно використовувати для виділення різких змін досліджуваного сигналу. У той же час комплексні аналітичні вейвлети дозволяють розділити амплітудну і фазову компоненти сигналу, що робить їх корисними при вимірюванні миттєвих частот. ВП на основі таких вейвлетів називають аналітичним вейвлет-перетворенням (АВП).

Залежність густини енергії від a и b для ВП називають скейлограмою [8]:

$$P_w f(a, b) = |Wf(a, b)|^2.$$

Опишемо адаптивне перетворення Фур'є [9].

Іншим недоліком ВПФ виявилось відсутність властивості самоподібності базисних функцій. Причиною цього недоліку є те, що в постійне по ширині в часовій області вікно $g(t)$ при різних значеннях частоти ω потрапляє різне число періодів гармонійної функції $e^{-i\omega t}$.

Від обох зазначених недоліків можна позбутися за допомогою перетворення Фур'є, якщо скористатися поряд з введенням віконної функції ідеєю побудови самоподібних базисів з теорії ВП.

В якості базисних функцій нового перетворення розглянемо [9]

$\varsigma_{a,\tau,v}(t) = Cg\left(\frac{t-\tau}{a}\right)e^{\left[i\pi v\left(\frac{t-\tau}{a}\right)\right]},$	(3.1.6)
--	---------

де, $C = \text{const}$, a – параметр масштабування, що визначає ширину віконної функції $g(t)$ ($a > 0$), τ – параметр з віконної функції у часовій області, v – коефіцієнт ($v > 0$), рівний числу періодів гармонійної функції, що укладаються на ширині віконної функції при цьому значенні a . Даний базис має зв'язок між віконною функцією $g(t)$ і осцилюючим множником, що забезпечує самоподібність даного базису.

Константа C обчислюється з умови нормування базисних функцій $\varsigma_{a,\tau,v}(t)$:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \varsigma_{a,\tau,v}(t) \varsigma_{a,\tau,v}^*(t) dt = 1.$$

Звідси випливає, що

$C = \frac{1}{\ g\ \sqrt{a}}, \quad \ g\ = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} g^2(t) dt}.$	(3.1.7)
--	---------

Величина $\|g\|$ залежить від вибору конкретної віконної функції $g(t)$. За аналогією з ВПФ будемо далі вважати, що, $\|g\| = 1$, оскільки при виборі конкретної віконної функції завжди можна провести її нормування. Підставляючи (3.1.7) в (3.1.6), отримуємо вид базисних функцій пропонованого нового перетворення:

$\varsigma_{a,\tau,v}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} g\left(\frac{t-\tau}{a}\right) e^{\left[i\pi v\left(\frac{t-\tau}{a}\right)\right]}.$	(3.1.8)
---	---------

Тоді саме перетворення може бути записано у вигляді:

$A_v f(a, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \varsigma_{a,\tau,v}^*(t) dt = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) g\left(\frac{t-\tau}{a}\right) e^{\left[-i\pi v\left(\frac{t-\tau}{a}\right)\right]} dt.$	(3.1.9)
---	---------

Тут перша буква в позначенні для функції спектральної щільності $A_v f(a, \tau)$ відповідає англійському «adaptive» (адаптивне).

Оскільки ФСГ ВПФ $A_v f(a, \tau)$ є комплекснозначною функцією, для неї за аналогією з ВПФ і АВП можна розглядати окремо $|A_v f(a, \tau)|$ та $\arg A_v f(a, \tau)$, а величину

$$P_A f(a, \tau) = |A_v f(a, \tau)|^2,$$

назвати спектрограмою АПФ. Вона має сенс двовимірної щільності енергії досліджуваного сигналу $f(t)$.

Перерахуємо основні властивості АПФ

1) Лінійність:

$$\hat{A}[\alpha f_1(t) + \beta f_2(t)] = \alpha \hat{A}[f_1(t)] + \beta \hat{A}[f_2(t)].$$

2) Масштабування:

$$\hat{A}[f(t - \xi)] = A_v f(\lambda a, \lambda \tau).$$

3) Розтягнення або стиснення функції $f(t)$ призводить до пропорційного масштабування ФСГ АПФ $A_v f(a, \tau)$ уздовж осей a и τ , а також до зміни її амплітуди.

4) Зрушення:

$$\hat{A}[f(t - \xi)] = A_v f(a, \tau - \xi).$$

5) Зсув функції $f(t)$ викликає зміщення ФСГ АПФ $A_v f(a, \tau)$ уздовж осі параметра зсуву τ на ту ж величину.

Для аналізу нестационарних процесів в геокосмосі застосовувалися ВПФ, АПФ і ВП. При цьому для ВПФ і АПФ використовувалися наступні вирази:

$$Sf(T, \tau) = \sqrt{\frac{2}{t_{ws}}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) g\left(\frac{t - \tau}{t_{ws}/2}\right) e^{\left[-i\frac{2\pi}{T}t\right]} dt,$$

$$A_v f(T_v, \tau) = \sqrt{\frac{2}{vT_v}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) g\left(\frac{t - \tau}{vT_v/2}\right) e^{\left[-i\frac{2\pi}{T_v}(t - \tau)\right]} dt,$$

де t_{ws} – ширина вікна для ВПФ; $T = 2\pi / \omega$ и $T_v = 2a / \nu$ – величини, що мають фізичний сенс періодів коливань. Індекс ν по можливості буде опускатися.

Для ВПФ і АПФ в якості (t) використовувалося вікно Хеммінга, яке має вигляд:

$$g_H(t) = \gamma[0.54 + 0.46 \cos(\pi t)],$$

де $\gamma \approx 1.12$ – нормируючий множник. Для ВП в якості $\psi(t)$ застосовувався вейвлет Морле, який задається виразом:

$$\psi(t) = e^{(-t^2/2)} \cos(5t).$$

При расчетах $t_{ws} = 120$, $v = 3$.

У результатах аналізу, крім функцій, $P_s(T, \tau)$, $P_A(T, \tau)$ і $P_w(T, \tau)$ представлені також залежності наступних величин:

$$E_s(T) = \int_{-\infty}^{\infty} P_s(T, \tau) d\tau, \quad E_A(T) = \int_{-\infty}^{\infty} P_A(T, \tau) d\tau, \quad E_w(T) = \int_{-\infty}^{\infty} P_w(T, \tau) d\tau.$$

Відомо, що для вейвлет-аналізу локальні максимуми в залежності $E_w(T)$ вказують на наявність гармонійних компонент з відповідними періодами в аналізованому сигналі. Швидше за все, подібну інформацію містять $E_s(T)$ і $E_A(T)$.

3.2. Загальні відомості про масив експериментальних даних

Аналізу і статистичній обробці підлягали варіації ДС, що супроводжували старти ракет в 2014 – 2015 рр. (табл. 3.1). Всього проаналізовано реєстрації для 27 стартів ракет, що мали місце з космодромів Росії, США, Франції, Японії та інших країн. Вимірювання виконані в різні сезони, в різний час доби в околиці ранкового і вечірнього термінаторів, в різних геофізичних умовах, при різній збуреності геомагнітного поля Землі. Загальна тривалість спостережень близько 252 год.

Ракети мали різну потужність. Умовно вони класифікуються так: з початковою масою понад 1000т – надважкими, з масою 300–1000т – важкими, з масою 100–300т – середньої тяжкості, з масою 30–100т – легкими, з масою 10–30т – надлегкими [6].

Таблиця 3.1. Відомості про час і місце запуску ракет

08.09.20	16:07:52	Союз У	Байконур	Росія
09.09.20	00:53	Протон К	Байконур	Росія
22.09.20	05:24:29	Minotaur	Ванденберг	США
13.10.20	01:32	Аріан 5G	Куру	Франція
19.10.20	21:05	Титан 4В	Ванденберг	США
08.11.20	16:07	Зеніт 3SL	Платформа для морського старту	Україна
09.11.20	05:53	Союз FG	Байконур	Росія
21.12.20	20:38	Союз U	Байконур	Росія
21.12.20	21:24	Космос 3М	Плесецьк	Росія
22.12.20	01:33	Аріан 5G	Куру	Франція
19.01.21	22:07	Атлас 5	Мис Канаверал	США
16.02.21	01:34:59	Зеніт 3SL	Платформа для морського старту	Україна
28.02.21	22:10	Протон М	Байконур	Росія
30.03.21	05:30:20	Союз FG	Байконур	Росія

Продовження таблиці 3.1.

13.04.21	02:30	Зеніт 3SL	Платформа для морського старту	Україна
28.04.21	14:02	Дельта 2	Мис Канаверал	США
25.05.21	01:11	Дельта 4	Мис Канаверал	США
15.06.21	11:00	Союз	Байконур	Росія
04.07.21	21:37:55	Діскавері	Мис Канаверал	США
17.07.21	16:07	Діскавері	Мис Канаверал	США
26.07.21	22:43	Дніпр	Байконур	Росія
28.07.21	10:05:41	Рокот	Плесецьк	Росія
12.08.21	01:24	Аріан 5	Куру	Франція
22.08.21	6:27	Зеніт 3SL	Платформа для морського старту	Україна
09.09.21	18:15	Атлантик	Мис Канаверал	США
18.09.21	7:07:40	Союз FG	Байконур	Росія
21.09.21	12:14	Атлантик	Мис Канаверал	США
29.09.21	4:13	Союз ТМА		
13.10.21	23:56	Аріан 5	Куру	Франція
17.10.21	19:28	Союз 2	Байконур	Росія
23.10.21	16:40	Союз У	Байконур	Росія
08.11.21	22:01	Протон М	Байконур	Росія
05.12.21	10:00	Антиракета	С-шК	-
09.12.21	00:08	Аріан 5	Куру	Франція
10.12.21	03:47:35	Діскавері	Мис Канаверал	США
14.12.21	23:00	Дельта 2	Ванденберг	США
18.12.21	08:32	Н-2А	Танегасіма	Японія
19.12.21	16:00:19	Космос 3М	Плесецьк	Росія
21.12.21	10:20	РС-20В	Оренбург	Росія
25.12.21	22:18	Протон К	Байконур	Росія
18.01.22	04:12	Союз	Байконур	Росія
31.01.22	01:22	Зеніт 3SL	Платформа для морського старту	Україна
19.01.21	18:25	Long March 3В	Хічанг (Китай)	ЧВ, ВЗ, ДЗ*
20.01.21	15:02	Falcon 9	Космічний центр Кеннеді (США)	ЧВ, ВЗ, ДЗ
02.02.21	22:45	Союз-2.1б	Плесецьк (Росія)	ВЗ, ДЗ
04.02.21	08:19	Falcon 9	Канаверал (США)	ВЗ, ДЗ
15.02.21	06:45:06	Союз-2.1а	Байконур (Казахстан)	ВЗ, ДЗ
16.02.21	05:59:37	Falcon 9	Канаверал (США)	ВЗ, ДЗ
04.03.21	02:53	Falcon 9	Космічний центр Кеннеді (США)	ВЗ, ДЗ

Продовження таблиці 3.1.

11.03.21	10:13	Falcon 9	Канаверал (США)	ВЗ, ДЗ
11.03.21	19:50	Long March 7A	Wenchang (Китай)	ВЗ, ДЗ
22.03.21	07:12	Союз-2.1a	Байконур (Казахстан)	ВЗ, ДЗ
23.03.21	00:30	Electron	Махія (Нова Зеландія)	ВЗ, ДЗ
24.03.21	10:28:24	Falcon 9	Канаверал (США)	ВЗ, ДЗ
25.03.21	04:47:33	Союз-2.1б	"Восточный" (Росія)	ВЗ, ДЗ
07.04.21	19:34:18	Falcon 9	Космічний центр Кеннеді (США)	ВЗ, ДЗ
09.04.21	10:42:41	Союз-2.1a	Байконур (Казахстан)	ВЗ, ДЗ
23.04.21	12:49	Falcon 9	Космічний центр Кеннеді (США)	ВЗ, ДЗ
29.04.21	06:12	Long March 5B	Wenchang (Китай)	ВЗ, ДЗ
06.05.21	21:11	Long March 2C	Xichang (Китай)	ВЗ, ДЗ
18.05.21	20:37	Atlas 5	Канаверал (США)	ВЗ, ДЗ
19.05.21	07:03	Long March 4B	Jiuguan (Китай)	ВЗ, ДЗ
26.05.21	21:59	Falcon 9	Канаверал (США)	ВЗ, ДЗ
28.05.21	20:38:39	Союз-2.1б	Восточный" (Росія)	ВЗ, ДЗ
29.05.21	15:55	Long March 7	Wenchang (Китай)	ВЗ, ДЗ
17.06.21	04:22:27	Long March 2F	Xichang (Китай)	ВЗ, ДЗ
17.06.21	09:35	Long March 2	Xichang (Китай)	ВЗ, ДЗ
17.06.21	19:09:35	Falcon 9	Канаверал (США)	ВЗ, ДЗ
18.06.21	09:30	Long March 2C	Xichang (Китай)	ВЗ, ДЗ
30.06.21	02:27:20	Союз-2.1б	Байконур (Казахстан)	ВЗ, ДЗ
30.06.21	22:31	Falcon 9	Канаверал (США)	ВЗ, ДЗ
01.07.21	15:48:33	Союз-2.1б	"Восточный" (Росія)	ВЗ, ДЗ
06.07.21	18:53	Long March 3C	Xichang (Китай)	ВЗ, ДЗ
09.07.21	14:59	Long March 6	Taiyuan (Китай)	ВЗ, ДЗ

Продовження таблиці 3.1.

21.07.21	17:58	Proton M	Байконур (Казахстан)	ВЗ, ДЗ
30.07.21	00:00	Ariane 5	Куру (Франція)	ВЗ, ДЗ
05.08.21	19:30	Long March 3C	Xichang (Китай)	ВЗ, ДЗ
11.08.21	01:01:55	Antares 230	Уоллопс (США)	ВЗ, ДЗ
12.08.21	03:13	PSLVMK.2	Шріхарікота (Індія)	ВЗ, ДЗ
19.08.21	01:32	Long March 4B	Taiyuan (Китай)	ВЗ, ДЗ
21.08.21	01:13:40	Союз-2.1б	Байконур (Казахстан)	ВЗ, ДЗ
28.08.21	01:36	Rocket 3.3	Кадьяк (США)	ВЗ, ДЗ
29.08.21	10:14:48	Falcon 9	Космічний центр Кеннеді (США)	ВЗ, ДЗ
09.09.21	22:59:47	Союз-2.1б	Плесецьк (Росія)	ВЗ, ДЗ
09.09.21	14:50	Long March 3	Xichang (Китай)	ВЗ, ДЗ
14.09.21	21:07:19	Союз-2.1б	Байконур (Казахстан)	ВЗ, ДЗ
20.09.21	10:10:11	Long March 7	Wenchang (Китай)	ВЗ, ДЗ
27.09.21	09:19	Ku 1A	Jiuguan (Китай)	ВЗ, ДЗ
27.09.21	11:20	Long March 3B	Xichang (Китай)	ВЗ, ДЗ
27.09.21	21:11	Atlas 5	Ванденберг (США)	ВЗ, ДЗ
05.10.21	11:55	Союз-2.1б	Байконур (Казахстан)	ВЗ

*ЧВ – часткові відбиття;
ВЗ – вертикальне зондування;
ДЗ – доплерівське зондування.

3.3. Фізичні процеси, що супроводжували стартам ракет

Перенесення збурень від джерел енерговиділення до місця спостереження здійснюється за допомогою як лінійних, так і нелінійних хвиль (табл. 3.2). Більшість цих типів хвиль спостерігалися в наших експериментах.

Приклад варіацій ДС при запуску російської ракети "Союз-У" з космодрому Байконур показаний на рис. А.1 (Додаток 1). Ця подія сталася о 16:08 8 вересня 2020 р. (тут і далі час Київський). Повна маса ракети становила близько 300 т, початкова тяга – 4 МН. Час роботи нульової, першої та другої ступенів дорівнювала 118, 286 і 250 с відповідно. Вимикання цих

ступенів відбувалося на висотах 48, 171 і 200 км, чому відповідали дальності від космодрому 44, 451 і 1680 км. Швидкості КА становили при цьому 1,8, 3,5 і 7,7 км/с. Ракета типу "Союз" відноситься скоріше до важких, потужність їх двигунів $\sim 10^{10} - 10^{11}$ Вт, а енерговиділення не менше 10^{13} Дж.

З рис. А.1 видно, що до СР мали місце сильні варіації ДС, які стали менше в інтервалі часу 15:40 – 16:20. Спектр був практично одномодовим. В інтервалі часу 16:30-17:30 спектр помітно розширювався (посилилися коливання доплерівського зміщення частоти f_d). Зміни характеру варіацій ДС мали місце в 16:30 і 17:00. Якщо вони викликані СР, то їм відповідають запізнювання $\Delta t_0 \approx 22$ хв і $\Delta t_1 \approx 52$ хв. радіохвиля в інтервалі часу з 16:08 до 17:00 відбивалася на висотах 390 – 465 км. якщо вважати, що обурення від джерела поширювалося приблизно на цій же висоті майже горизонтально по відношенню до поверхні землі, то час підйому δt ракети на висоту 425 км становило

Таблиця 3.2. Типи хвиль, що переносять збурення на глобальні відстані[1]

Тип хвилі	Фазова швидкість, км/с	Період, с	Декремент загасання, км ⁻¹	Середовище поширення
Акустична	0.3 – 0.7	$10^{-2} - 300$	$10^2 - 10^{-5}$	Атмосфера ($z \leq 400$ км)
Внутрішня гравітаційна	0.3 – 0.7	>300	$10^{-4} - 10^{-3}$	Атмосфера ($z \leq 400$ км)
Повільна МГД	10 – 1 50 – 5	$10^2 - 10^4$ те саме	$2 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-4}$ $10^{-3} - 10^{-4}$	Е- область іоносфери F- область іоносфери
Сейсмічна: поздовжня поперечна	6.5 – 7.5 4 – 5	0.1 – 30 те саме	$10^{-5} - 10^{-3}$ те саме	Літосфера те саме
Магнітоградієнт на: день ніч	$\sim 0.3 - 1$ $\sim 1 - 5$	$3 \cdot 10^4 - 10^5$ $5 \cdot 10^2 - 5.4 \cdot 10^3$	Не оцінювався Не оцінювався	Е- область іоносфери те саме
Гіротропна: день ніч	10 – 100 100 – 1000	$10 - 10^4$ те саме	Не оцінювався Не оцінювався	Е- область іоносфери те саме
МГД	~ 1000	$>10^{-2}$	$<10^{-5} - 10^{-4}$	Іоносфера, магнітосфера

близько 8 хв. При цьому скориговані значення $\Delta t'_0 \approx 14$ хв, $\Delta t'_1 \approx 44$ хв. За час $\delta t \approx 8$ хв ка віддаляється в основному в східному напрямку від космодрому

приблизно на 1200 км (Відстань до місця реєстрації становило $R \approx 2050$ км). При цьому $v'_0 = R/\Delta t'_0 \approx 3,9$ км/с, $v'_1 \approx 1,23$ км/с. Ці швидкості близькі до швидкості ММГД-хвиль з частотою $10^{-3} - 10^{-2}$ с $^{-1}$ (періодом 10 – 100 хв). Для цих хвиль глибина загасання становить кілька тисяч кілометрів.

Старт ракети "Протон К" (див. рис. А.2 (Додаток 1)) стався 9 вересня 2020 року о 00:53 з космодрому Байконур (Росія) $L \approx 2050$ км.

Ймовірною реакцією іоносфери на старт ракети є 1 тип збурення: квазіперіодичний процес з 2:10 до 3:50. Збуренню відповідають $\tau \approx 77$ хв, $v \approx 0,45$ км/с, $v' \approx 0,48$ км/с. З такими швидкостями в іоносфері поширюються АГВ хвилі.

Старт ракети "Minotaur" (див. рис. А.3 (Додаток 1)) стався 22 вересня 2020 року о 5:24 з космодрому Вандербенг (США) $L \approx 10370$ км.

Ймовірною реакцією іоносфери на старт ракети є 1 Тип збурення : зміщення f_d в бік позитивних частот з розширенням спектра з 6:00 до 6:50. Збуренню відповідають $\tau \approx 36$ хв, $v \approx 4,8$ км/с, $v' \approx 5,5$ км/с. З такими швидкостями в іоносфері поширюються повільні МГД хвилі.

Реакцію на старт ракети "Ariane 5G ", який стався 13 жовтня 2020 року о 1:32 виявити не вдалося.

Старт ракети "Titan 4B (див. рис. А.4 (Додаток 1)) стався 19 жовтня 2020 року о 21:05 з космодрому Вандербенг (США) $L \approx 10370$ км.

Ймовірною реакцією іоносфери на старт ракети є 1 тип збурень: квазіперіодичні коливання з 21:45 до 22:25. Обуренню відповідають $\tau \approx 40$ хв, $v \approx 4,3$ км/с, $v' \approx 4,93$ км/с. З такими швидкостями в іоносфері поширюються повільні МГД хвилі.

Старт ракети "Zenith 3SL" (див. рис. А.4 (Додаток 1)) стався 8 листопада 2020 року о 16:07 з платформи для Морського старту (Україна) $L \approx 7000$ км.

Ймовірною реакцією іоносфери на старт ракети є 2 типи: зміщення f_d у бік негативних частот, поява другої моди з 16:55 до 17:45. Цьому обуренню відповідають $\tau \approx 48$ хв, $v \approx 2,4$ км/с, $v' \approx 2,7$ км/с. З такими швидкостями в іоносфері поширюються повільні МГД хвилі.

Старт ракети "Союз ФГ" (див.рис. А.5 (Додаток 1)) стався 9 листопада 2020 року о 5:53 з космодрому Байконур (Росія) $L \approx 2050$ км.

Ймовірною реакцією іоносфери на старт ракети є 2 типи обурень: f_d в сторону позитивних частот з 6:00 до 6:40 і поява другої (слабовираженої) моди з 6:40 до 7:10. Першого збурення відповідають $\tau \approx 7$ хв, $v \approx 4,8$ км/с, $v' \approx 16,6$ км/с, другого – $\tau \approx 47$ хв, $v \approx 0,72$ км/с, $v' \approx 0,81$ км/с. З такими швидкостями в іоносфері поширюються повільні МГД хвилі і АГВ хвилі відповідно.

Старт ракет "Союз У" і "Космос 3М" (див. рис. А.6 (Додаток 1)) відбувся 21 грудня 2020 року о 20:38 та 21:24 з космодрому Байконур (Росія) $L \approx 2050$ км та з космодрому Плесецьк (Росія) $L \approx 1470$ км.

Реакцію на старт ракети "Союз У" (див. рис. 8.6 (Додаток 1)), виявити не вдалося.

Ймовірною реакцією іоносфери на старт ракети "Космос 3М" є 1 тип збурення: квазіперіодичні коливання, зміщення f_d у бік збільшення періодів з

розширенням спектра з 22:00 до 0:05. Збуренню відповідають $\tau \approx 46$ хв, $v \approx 0,53$ км/з, $v' \approx 0,58$ км/с. З такою швидкістю в іоносфері поширюються АГВ хвилі.

Старт ракети "Ariane 5G" (див. рис. А.7 (Додаток 1)) стався 22 грудня 2020 року о 1:33 з космодрому Куру (Франція) $L \approx 9500$ км.

Ймовірною реакцією іоносфери на старт ракети є 2 типи збурень: квазіперіодичний процес і поява другої моди з 1:46 до 3:50. Збуренню відповідають $\tau \approx 13$ хв, $v \approx 12,1$ км/с, $v' \approx 19,8$ км/с. З такими швидкостями в іоносфері поширюються повільні МГД хвилі.

Старт ракети "Atlase 5" (див. рис. А.8 (Додаток 1)) стався 19 січня 2020 року о 22:07 з космодрому Мис Канаверал (США) $L \approx 9330$ км.

Ймовірною реакцією іоносфери на старт ракети є 2 типи збурень: квазіперіодичні коливання, зміщення f_d у бік позитивних частот з 22:30 до 0:00. Збуренню відповідають $\tau \approx 23$ хв, $v \approx 6,8$ км/сек, $v' \approx 8,6$ км/с. З такими швидкостями в іоносфері поширюються повільні МГД хвилі.

Старт ракети "Zenith 3SL" (див. рис. А.9 (Додаток 1)) стався 16 лютого 2021 року о 1:35 з платформи для Морського старту (Україна) $L \approx 7000$ км.

Ймовірною реакцією іоносфери на старт ракети є 2 типи збурень: зміщення f_d в бік негативних частот з 3:05 до 3:45, поява другої моди з 2:00 до 3:10. Першого збурення відповідають $\tau \approx 90$ хв, $v \approx 1,3$ км/с, $v' \approx 1,38$ км/с, другого – $\tau \approx 25$ хв, $v \approx 4,7$ км/с, $v' \approx 5,83$ км/с. З такими швидкостями в іоносфері поширюються повільні МГД хвилі.

Старт ракети "Союз ФГ" (див. рис. А.10 (Додаток 1)) стався 30 березня 2006 року о 5:30 з космодрому Байконур (Росія) $L \approx 2050$ км.

Ймовірною реакцією іоносфери на старт ракети є 2 типи збурень: f_d в бік позитивних частот і поява другої моди з 5:45 до 6:50. Збуренню відповідають $\tau \approx 15$ хв, $v \approx 2,3$ км/с, $v' \approx 3,4$ км/с. З такими швидкостями в іоносфері поширюються повільні МГД хвилі.

Реакцію на старт ракети "Zenith 3SL" (див. рис. А.11 (Додаток 1)), який стався 13 квітня 2021 року о 2:30 виявити не вдалося.

Реакцію на старт ракети "Delta 2", який стався 28 квітня 2006 року о 14:02 виявити не вдалося.

Розглянемо далі старт американського космічного корабля багаторазового використання "Дискавері" з космодрому на мисі Канаверал ($L \approx 9330$ км), який стався в 16:07 17 липня 2021 р. Повна маса ракети була близько 2030 т, початкова тяга ~ 26 МН, тривалість роботи розгінного блоку і двигунів складала 124, 480 і 480 с. Такі ракети відносяться до класу надважких, потужність їх двигунів $\sim 10^{11} - 10^{12}$ Вт, а енерговиділення не менш 10^{14} Дж [5]. Приблизно за 1 год до події іоносфера залишалася спокійною, спостерігався квазіперіодичний процес з $T \approx 20$ хв і амплітудою доплерівського зміщення $f_{da} \approx 0,2$ Гц (див. А.12 (Додаток 1)). Ймовірною реакцією іоносфери на старт ракети є 1 тип збурення – квазіперіодичні коливання з 16:50 до 17:30 і з 18:40 до 19:15. Цим збурень відповідають $\tau \approx 43$ хв, $v \approx 3,6$ км/с, $v' \approx 4,4$ км/с $\tau \approx 153$ хв, $v \approx 1,01$ км/с, $v' \approx 1,05$ км/с. З такими швидкостями в іоносфері поширюються повільні МГД хвилі.

Старт ракети "Dniepr" (див. рис. А.13 (Додаток 1)) відбувся 26 липня 2021 року о 22:43 з космодрому Байконур (Росія) $L \approx 2050$ км.

Ймовірною реакцією іоносфери на старт ракети є 2 типи возмущений-поява другої моди, зміщення f_d в сторону позитивних частот з 23:40 до 00:20 і зміщення f_d в сторону позитивних частот з 2:45 до 4:00. Обуренню відповідають $\tau \approx 67$ хв, $v \approx 0,51$ км/с, $v' \approx 0,55$. З такою швидкістю в іоносфері поширюються АГВ хвилі.

Старт ракети "Zenith 3SL" (див. рис. А.14 (Додаток 1)) стався 22 серпня 2021 року о 6:27 з платформи для Морського старту (Україна) $L \approx 7000$ км.

Ймовірною реакцією іоносфери на старт ракети є 1 тип збурення: квазіперіодичні коливання з 7:16 до 9:10. Цьому збуренню відповідають $\tau \approx 49$ хв, $v \approx 2,4$ км/с, $v' \approx 2,65$ км/с. З такими швидкостями в іоносфері поширюються повільні МГД хвилі.

Старт ракети "Atlantis" (див. рис. А.15 (Додаток 1)) стався 9 вересня 2021 року о 18:15 з космодрому Мис Канаверал (США) $L \approx 9330$ км.

Ймовірною реакцією іоносфери на старт ракети є 1 тип збурення: квазіперіодичні коливання, зміщення f_d у бік збільшення періодів з розширенням спектра з 19:18 до 21:20. Збуренню відповідають $\tau \approx 63$ хв, $v \approx 2,47$ км/с, $v' \approx 2,68$ км/с. з такими швидкостями в іоносфері поширюються повільні МГД хвилі.

Старт ракети "Atlantis" (див. рис. А.16 (Додаток 1)) стався 21 вересня 2021 року о 12:14 з космодрому Мис Канаверал (США) $L \approx 9330$ км.

Ймовірною реакцією іоносфери на старт ракети є 1 тип збурення: квазіперіодичні коливання з 12:31 до 12:50 і з 14:00 до 15:45. Обуренню відповідають $\tau \approx 17$ хв, $v \approx 9,14$ км/с, $v' \approx 12,9$ км/с $\tau \approx 106$ хв, $v \approx 1,47$ км/с, $v' \approx 1,54$ км/с. З такими швидкостями в іоносфері поширюються повільні МГД хвилі.

Старт ракети "Союз ТМА" (див. рис. А.17 (Додаток 1)) відбувся 29 вересня 2021 року о 4:13 передбачувано $L \approx 9000$ км.

Реакцію на старт виявити не вдалося через невідомість відстані від місця старту ракети до місця спостереження.

Старт ракети "Ariane 5G " (див. рис. А.18 (Додаток 1)) відбувся 13 жовтня 2021 року о 23:56 з космодрому Куру (Франція) $L \approx 9500$ км.

Ймовірною реакцією іоносфери на старт ракети є 1 тип збурення: ширококутовий процес з 00:12 до 00:40. Збуренню відповідають $\tau \approx 16$ хв, $v \approx 9,9$ км/сек, $v' \approx 13,1$ км/с. З такими швидкостями в іоносфері поширюються повільні МГД хвилі.

Реакцію на старт ракети "Proton M" (див. рис. А.18 (Додаток)), який стався 8 листопада 2021 року о 22:00 виявити не вдалося.

Старт ракети "Discovery" (див. рис. А.20 (Додаток 1)) стався 10 грудня 2006 року о 3:47:35 з космодрому Мис Канаверал (США) $L \approx 9330$ км.

Ймовірною реакцією іоносфери на старт ракети є 1 Тип збурення: квазіперіодичні коливання з 4:01 до 4:45. Цьому збуренню відповідають $\tau \approx 24$ хв, $v \approx 6,5$ км/с, $v' \approx 8,1$ км/с. З такими швидкостями в іоносфері поширюються АГВ хвилі.

Старт ракети "Delta 2" (див. рис. А.21 (Додаток 1)) стався 14 грудня 2021 року о 23:00 з космодрому Вандербенг (США) $L \approx 10370$ км.

Ймовірною реакцією іоносфери на старт ракети є 1 тип збурення – квазіперіодичні коливання з 00:08 до 00:52. Цьому збуренню відповідають $\tau \approx 68$ хв, $v \approx 2,54$ км/с, $v' \approx 2,74$ км/с. З такими швидкостями в іоносфері поширюються повільні МГД хвилі.

Старт ракети "Союз ТМА" (див. рис. А.22 (Додаток 1)) відбувся 29 вересня 2021 року о 4:13. Реакцію на старт виявити не вдалося через невідомість відстані від місця старту ракети до місця спостереження.

Старт ракети "Протон К" (див. рис. А.23 (Додаток 1)) відбувся 25 грудня 2021 року о 22:18 з космодрому Байконур (Росія) $L \approx 2050$ км.

Ймовірною реакцією іоносфери на старт ракети є 2 типи збурень: f_d в бік позитивних частот і поява другої моди з 22:44 до 0:10. Збуренню відповідають $\tau \approx 26$ хв, $v \approx 1,3$ км/с, $v' \approx 1,62$ км/с. З такими швидкостями в іоносфері поширюються повільні МГД хвилі.

Реакцію на старт ракети "Союз", який стався 18 січня 2007 року о 4:12 виявити не вдалося.

Старт ракети "Zenith 3SL" (див. рис. А.24 (Додаток 1)) стався 31 січня 2022 року о 1:22 з платформи для Морського старту (Україна) $L \approx 7000$ км.

Ймовірною реакцією іоносфери на старт ракети є 2 типи збурень: квазіперіодичний процес і поява другої моди з 3:36 до 4:50. Збуренню відповідають $\tau \approx 134$ хв, $v \approx 0,87$ км/с, $v' \approx 0,9$ км/с. з такими швидкостями в іоносфері поширюються повільні МГД хвилі.

4. ВИСНОВКИ

1. На іоносферу постійно впливають джерела як природного так і штучного (антропогенного) походження.

2. Метод доплерівського радіозондування полягає у вимірюванні та аналізі доплерівського зміщення частоти відбиваються радіохвиль, викликаного нестаціонарними процесами в середній іоносфері.

3. Доплерівський радар ХНУ імені В.Н.Каразіна дозволяє досліджувати нестаціонарні процеси в іоносфері, якщо концентрація електронів змінюється на величину не менше 1% за характерний час 1 – 10 хвилин.

4. Унікальні математичні властивості вейвлетів зробили їх потужним інструментом аналізу і подальшого синтезу будь-якого сигналу. Вейвлет-аналіз є ефективним для обробки нестаціонарних сигналів і сигналів з локальними особливостями. Вейвлет-аналіз практично вільний від недоліків спектрального аналізу.

5. Проаналізовано результати вимірювань, виконаних в різні сезони, в різний час доби в околиці ранкового і вечірнього термінаторів, в різних геофізичних умовах, при різній збуреності геомагнітного поля Землі.

6. Вивчено реакцію геокосмосу на старти і польоти ракет і космічних апаратів. Всього проаналізовано 25 стартів, що мали місце з космодромів Байконур (9 стартів), Плесецьк (1 старт), Куру (3 старту), з платформи для Морського старту (5 стартів). Відстань від космодрому до обсерваторії змінювалося від 1500 до 10370 км.

Впевнена реакція виявлена в 76% випадків. Спостерігалось 3 групи швидкостей 0,3 – 1 км/с, 1 – 10 км/с, 10 – 100 км/с. Цим швидкостей відповідають акустичні, повільні МГД і гиротропні хвилі.

7. Вивчено реакцію геокосмосу на проходження ранкового та вечірнього сонячних термінаторів. Всього проаналізовано 15 подій.

Впевнена реакція виявлена в 80% випадків. В одних випадках спостерігалось посилення, а в інших – придушення коливань з періодами 20 – 120 хв.

5. СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Л.Ф. Чорногор. Нелінійна радіофізика. / Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна. – Харків. – 2016. – 208 с.
2. С.А. Намазов, В.Д. Новіков. Доплерівське зміщення частоти при іоносферному поширенні декаметрових радіохвиль. Вісті ВНЗ. – Радіофізика. – Т. XVIII, № 4 – 1975. – с. 113–140
3. Davies K. Ionospheric Radio/ London: Peter Peregrinus – 1990. – 580 p.
4. В.П. Бурмака, Л.С. Костров, Л.Ф. Чорногор. Статистичні характеристики сигналів доплерівського ВЧ радара під час зондування середньої іоносфери, обуреної стартами ракет та сонячним термінатором. – Радіофізика та радіоастрономія. – 2003.– Т 8. № 2. с. 143-162.
5. В.П. Бурмака, В.І. Таран, Л.Ф. Чорногор. Хвильові збурення в іоносфері, які супроводжували старт ракет на тлі природних перехідних процесів. – Геомагнетизм та аерономія. – 2004. – Т. 44, №4 с.518-534.
6. Л.С. Костров, В.Т. Розуменко, Л.Ф. Чорногор. Доплерівське радіозондування збурень у середній іоносфері, що супроводжують старти та польоти космічних апаратів. – Радіофізика та радіоастрономія. – 1999.– Т. 4, №3 с.227-246.
7. М.Н.Фактулін, Є.В.Заруцька, В.А.Фактуліна. До прояву під час магнітних бур аврорального джерела середньомасштабних неоднорідностей електронної концентрації у шарі F іоносфери. – Космічні дослідження. – 1996. – Т.34.С.15.
8. В. П. Дияконів. Вейвлет. Від теорії до практики. Солон-Р. – 2002. – 448с.
9. О. В. Лазоренко, С. В. Панасенко, Л. Ф. Чорногор. Адаптивне перетворення Фур'є. Електромагнітні хвилі та електронні системи. – 2005. – т.10, №10, с. 39 – 49.

6. ДОДАТОК 1

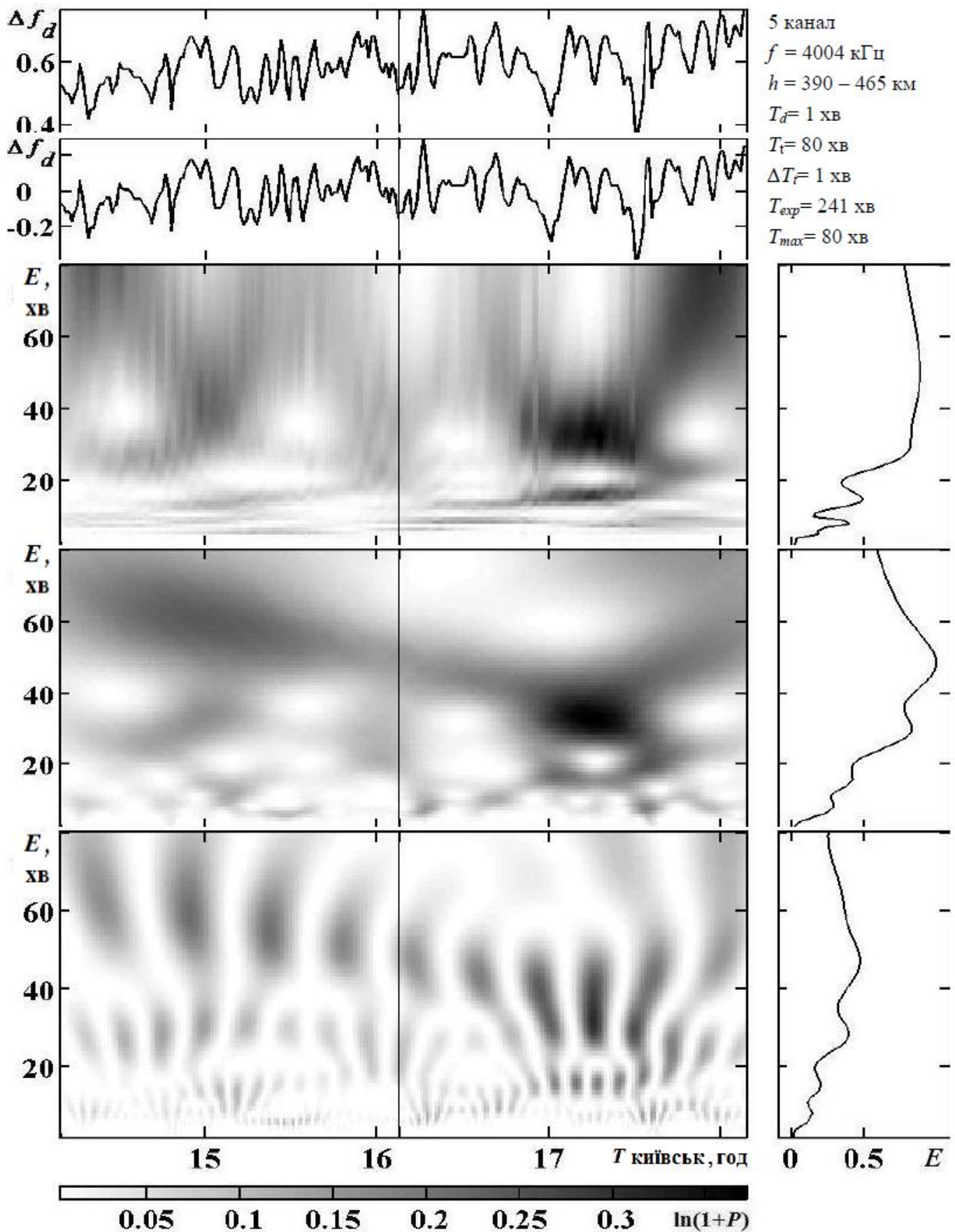


Рис. А.1. Результати спектрального і вейвлет аналізу ДС частоти для 8 вересня 2020 р. супроводжували СРСР Союз У (Байконур). Момент СР показаний суцільною лінією.

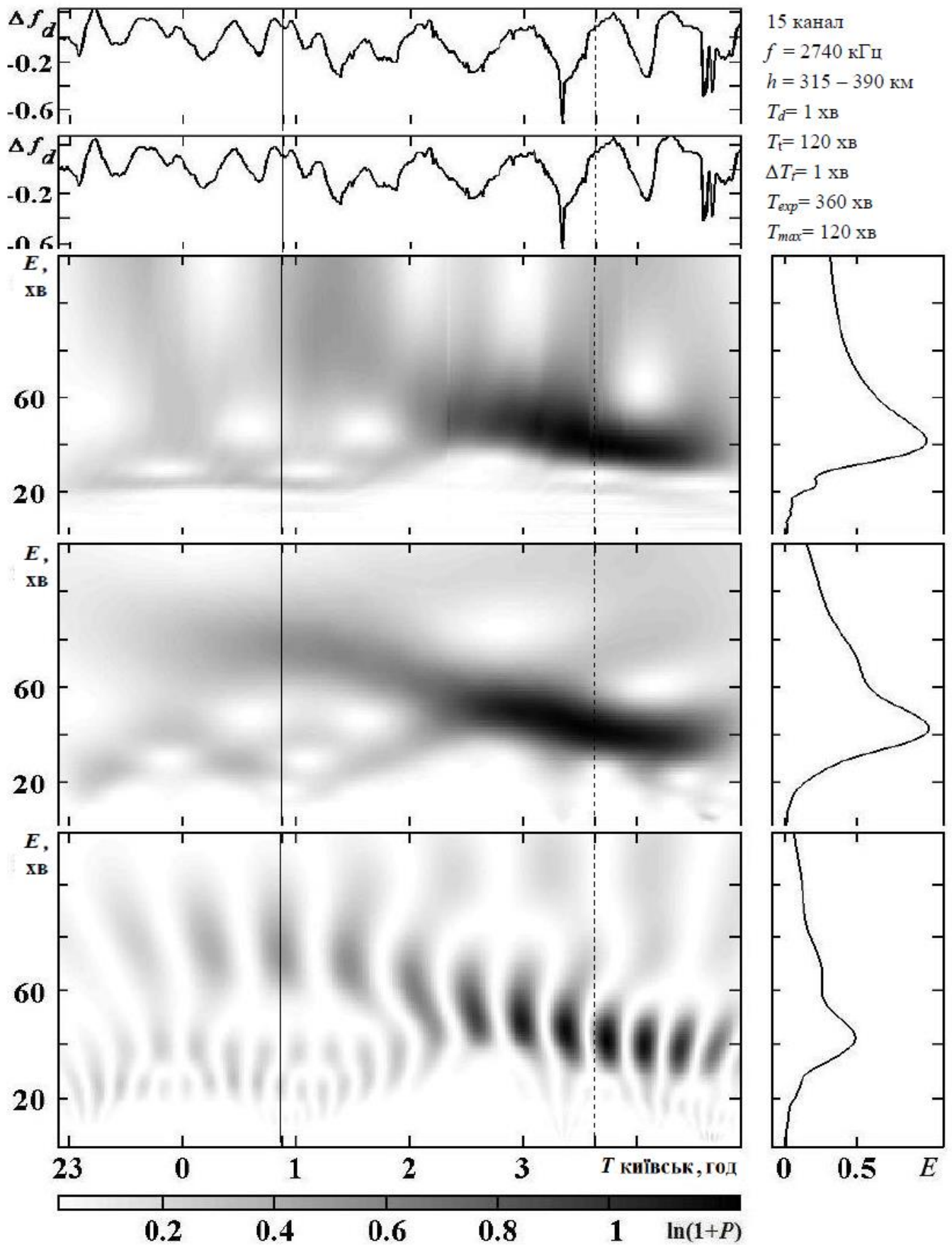


Рис.А.2. Результати спектрального і вейвлет аналізу ДС частоти для 9 вересня 2020 р. супроводжували СР Proton К (Байконур). Момент СР показаний суцільною, а момент ВС на висоті 450 км – пунктирною лінією.

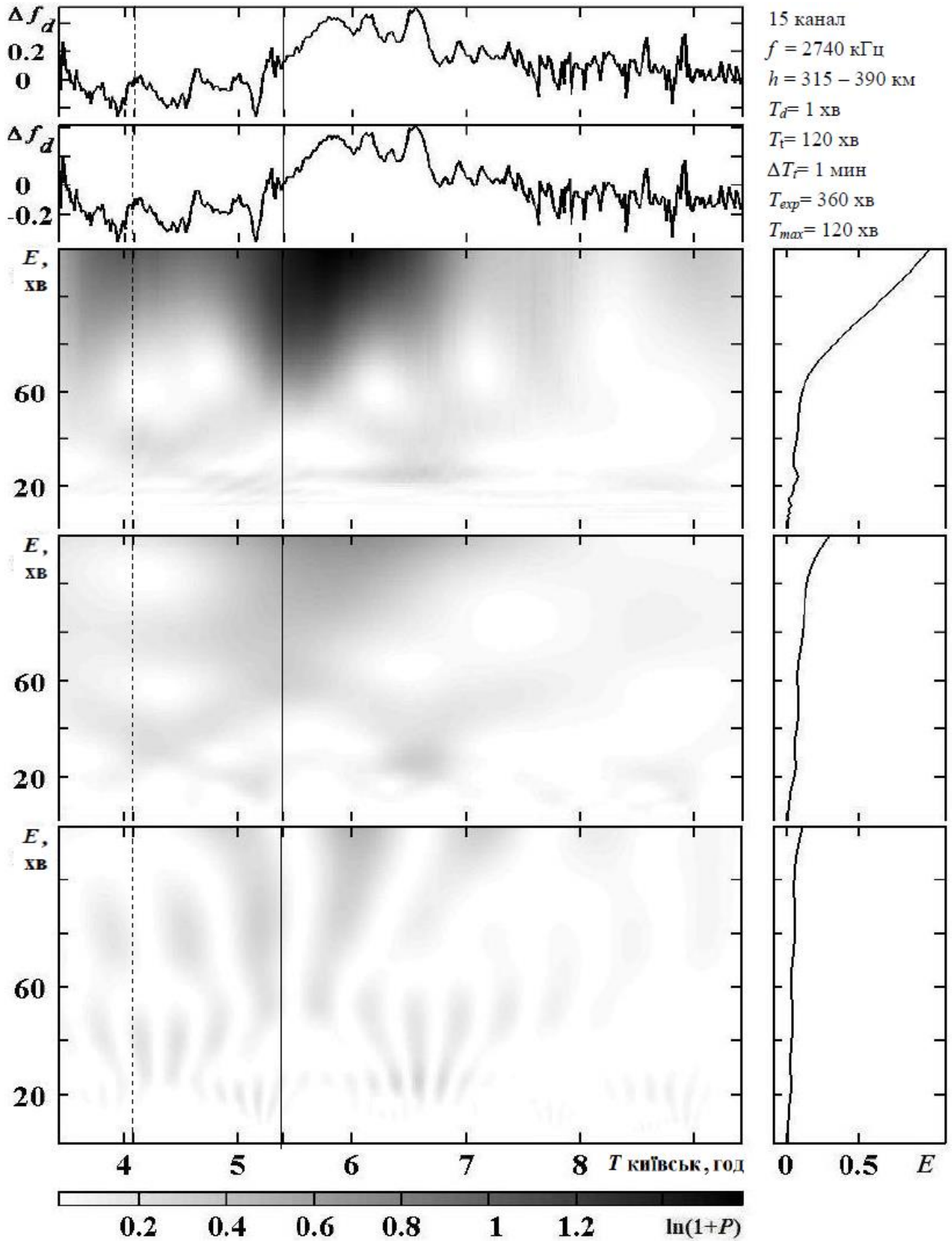


Рис. А.3. Результати спектрального і вейвлет аналізу ДС частоти для 22 вересня 2020 р супроводжували СР Minotaur (Вандербенг). Момент СР. показаний суцільною, а момент ВС на висоті 450 км – пунктирною лінією.

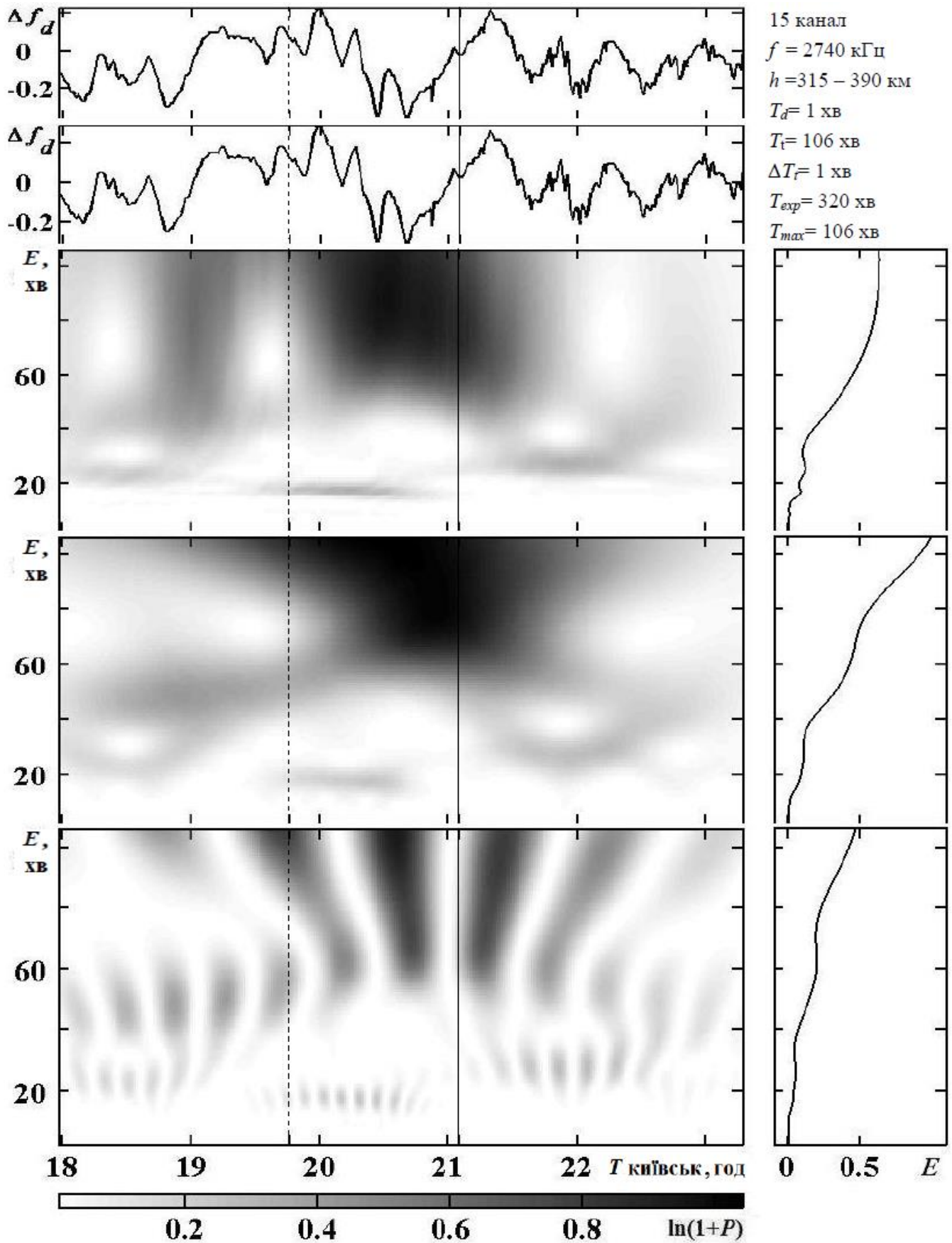


Рис. А.4. Результати спектрального і вейвлет аналізу ДС частоти для 19 жовтня 2020 р. супроводжували СР Titan 4В (Вандербенг). Момент СР показаний суцільною, а момент ЗС на висоті 450 км – пунктирною лінією.

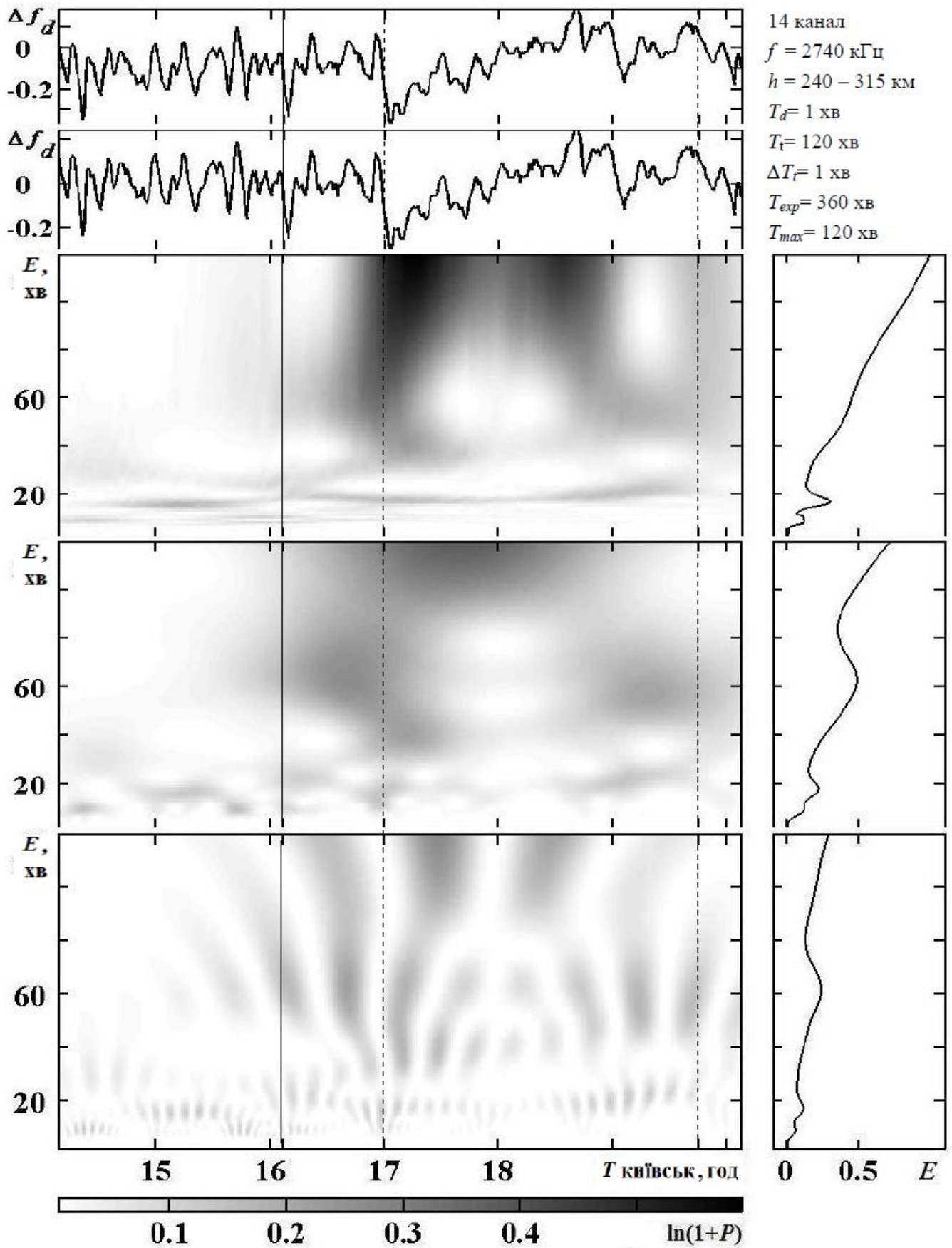


Рис А.5. Результати спектрального і вейвлет аналізу ДС частоти за 8 листопада 2020 р. супроводжували СР Zenith 3SL (платформа для морського СР). Момент СР показаний суцільною, а момент ЗС на висоті 0 км і 450 км – пунктирною лінією.

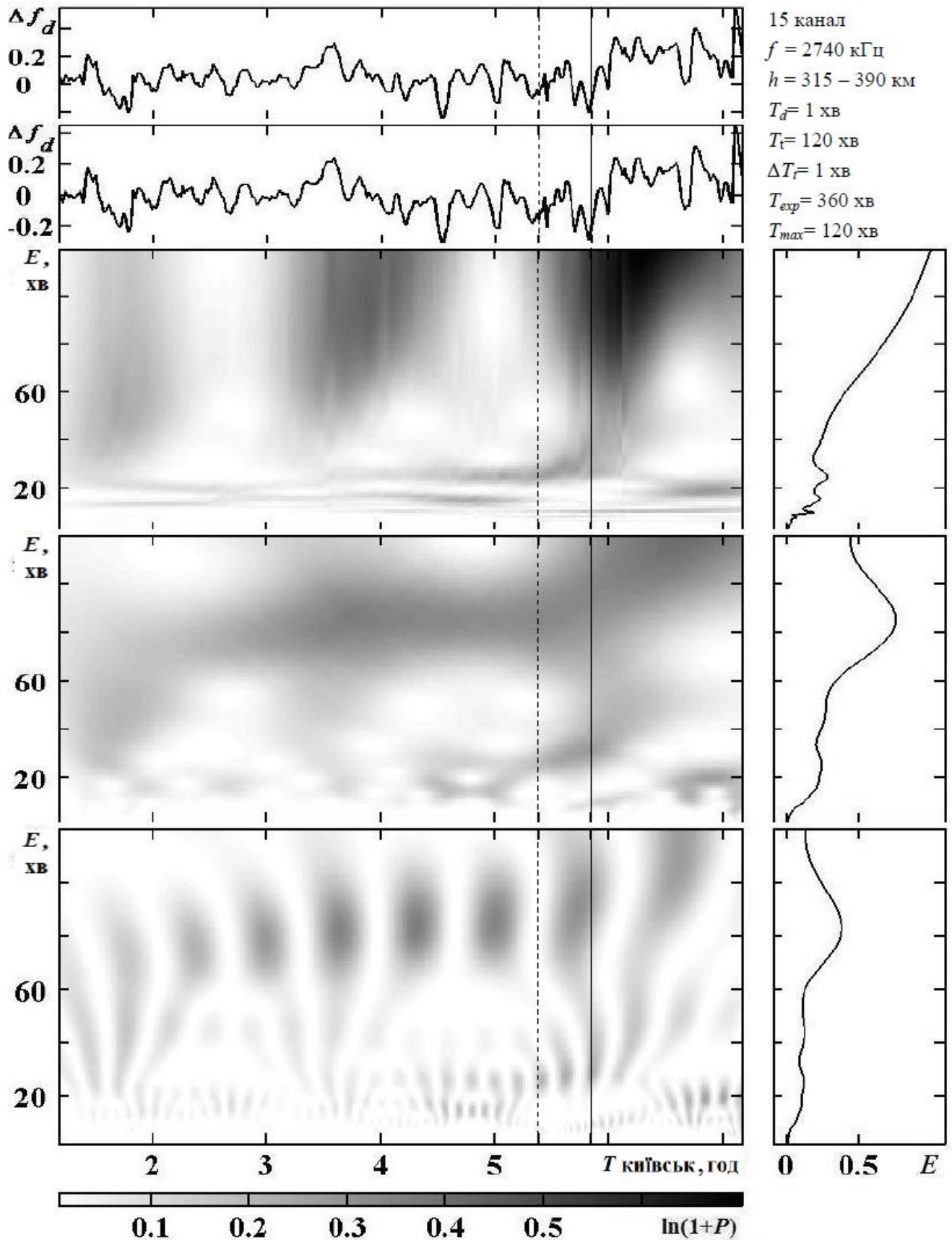


Рис А.6. Результати спектрального і вейвлет аналізу ДС частоти за 9 листопада 2020 р. супроводжували СР Союз ФГ (Байконур). Момент СР показаний суцільною, а момент ВС на висоті 450 км – пунктирною лінією.

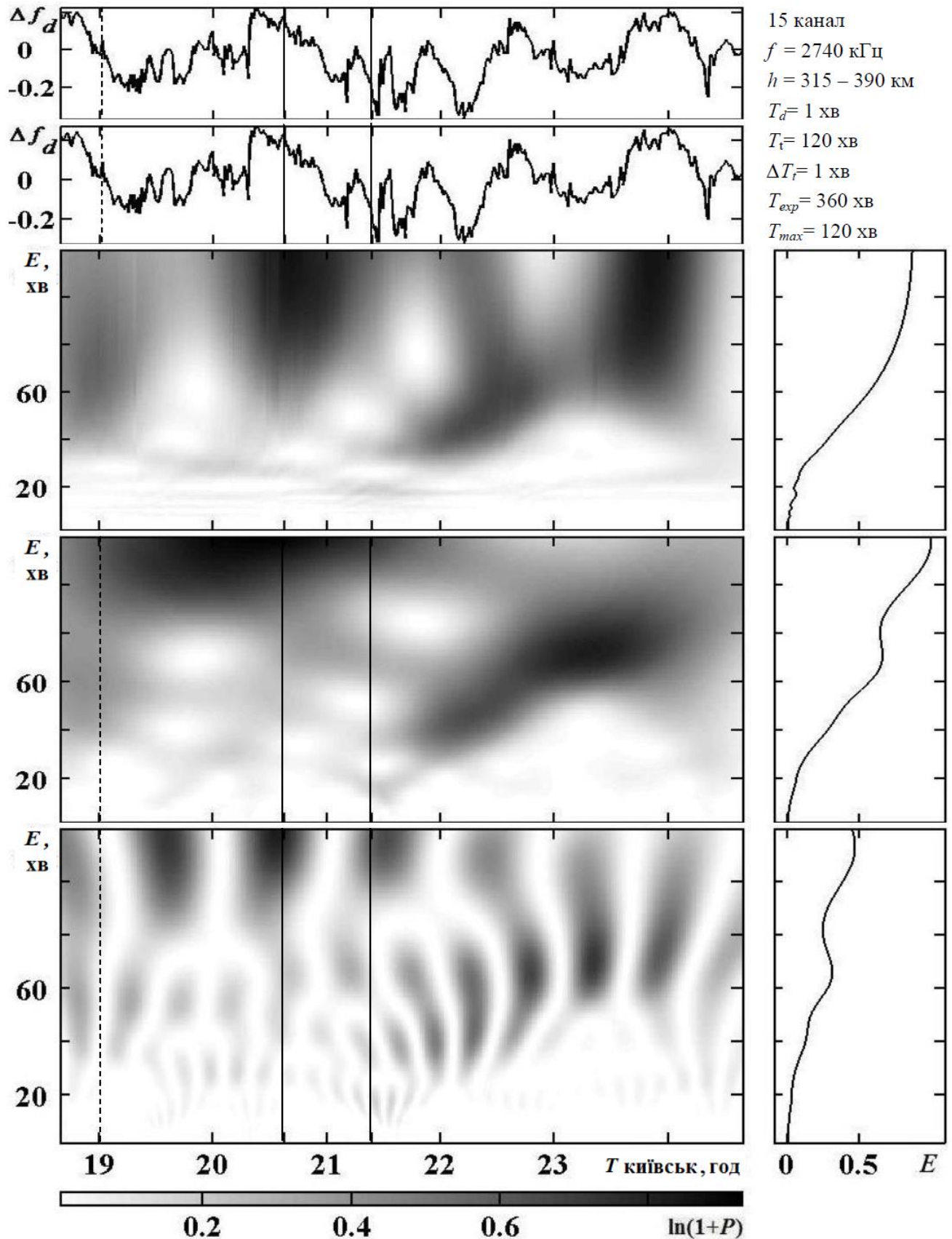


Рис А.7. Результати спектрального та вейвлету аналізу ДС частоти для 21 грудня 2020 р. супроводжували СР Союз У (Байконур) та Космос 3М (Плесецьк). Момент СР показаний суцільною, а момент ЗС на висоті 450 км – пунктирною лінією.

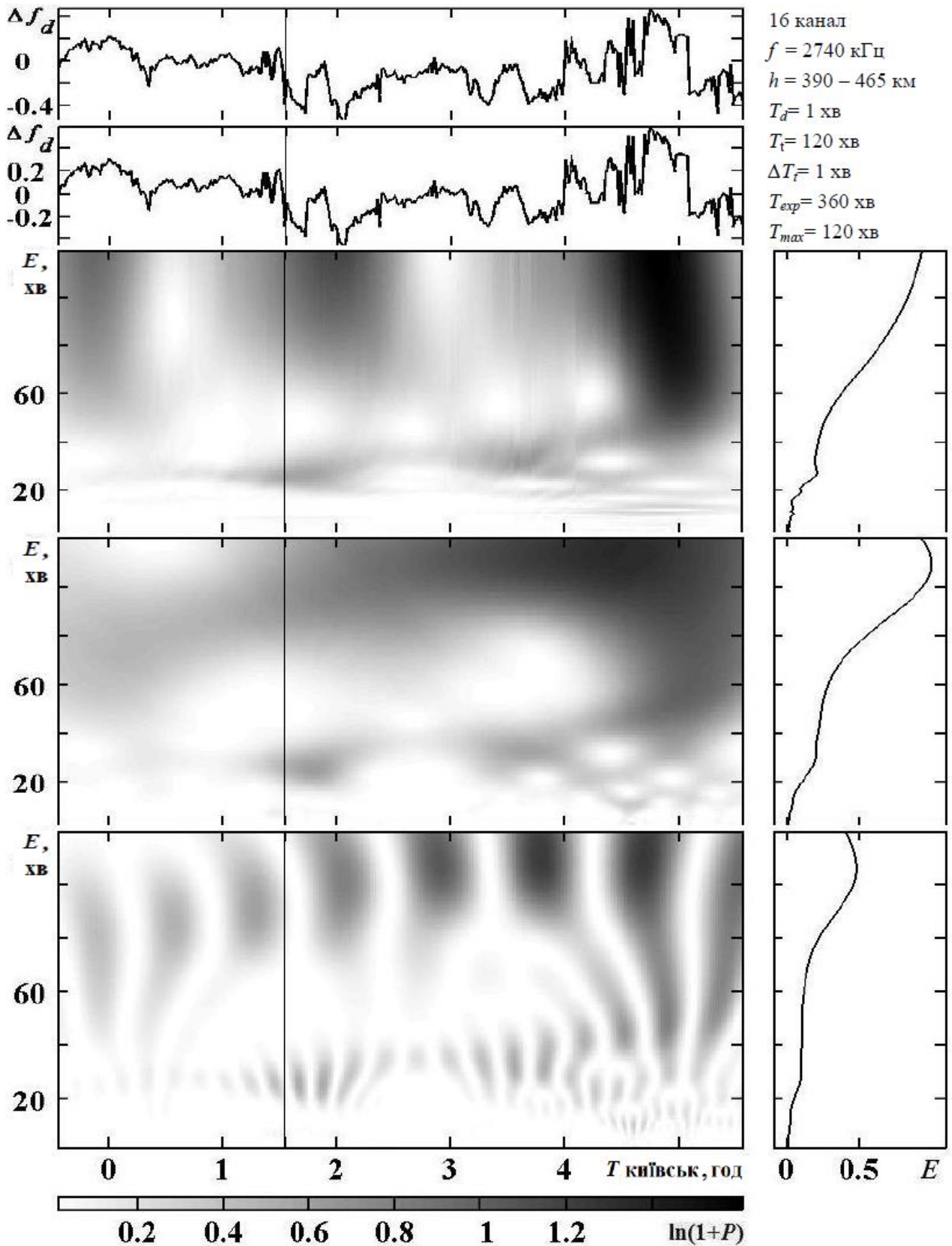


Рис. А.8. Результати спектрального і вейвлет аналізу ДС частоти за 22 грудня 2020 р. супроводжували СР Ariane 5G (Куру). Момент СР показаний суцільною лінією.

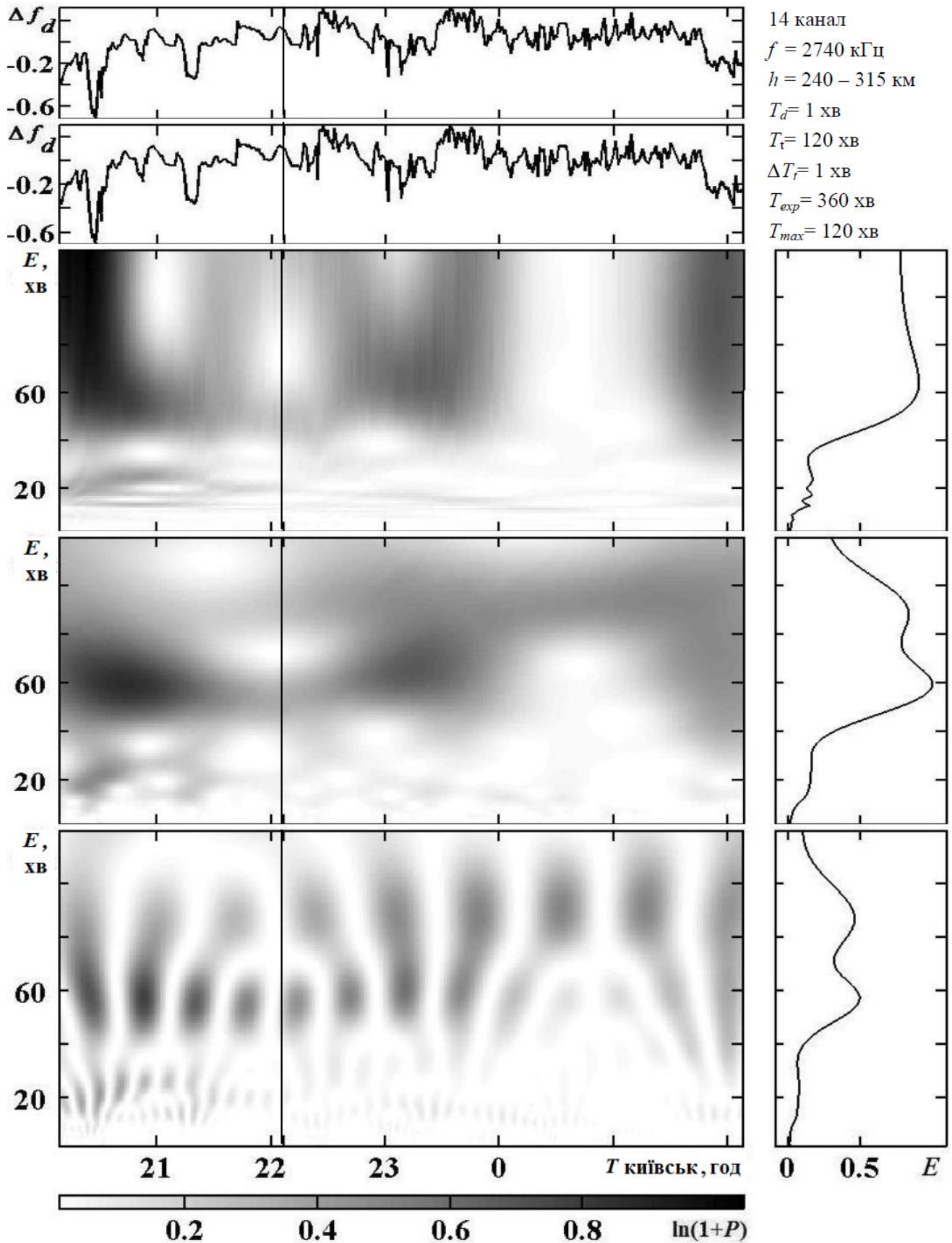


Рис А.9. Результати спектрального і вейвлет аналізу ДС частоти за 19 січня 2021р. супроводжували СР Atlas 5 (Мис Канаверал). Момент СР показаний суцільною лінією.

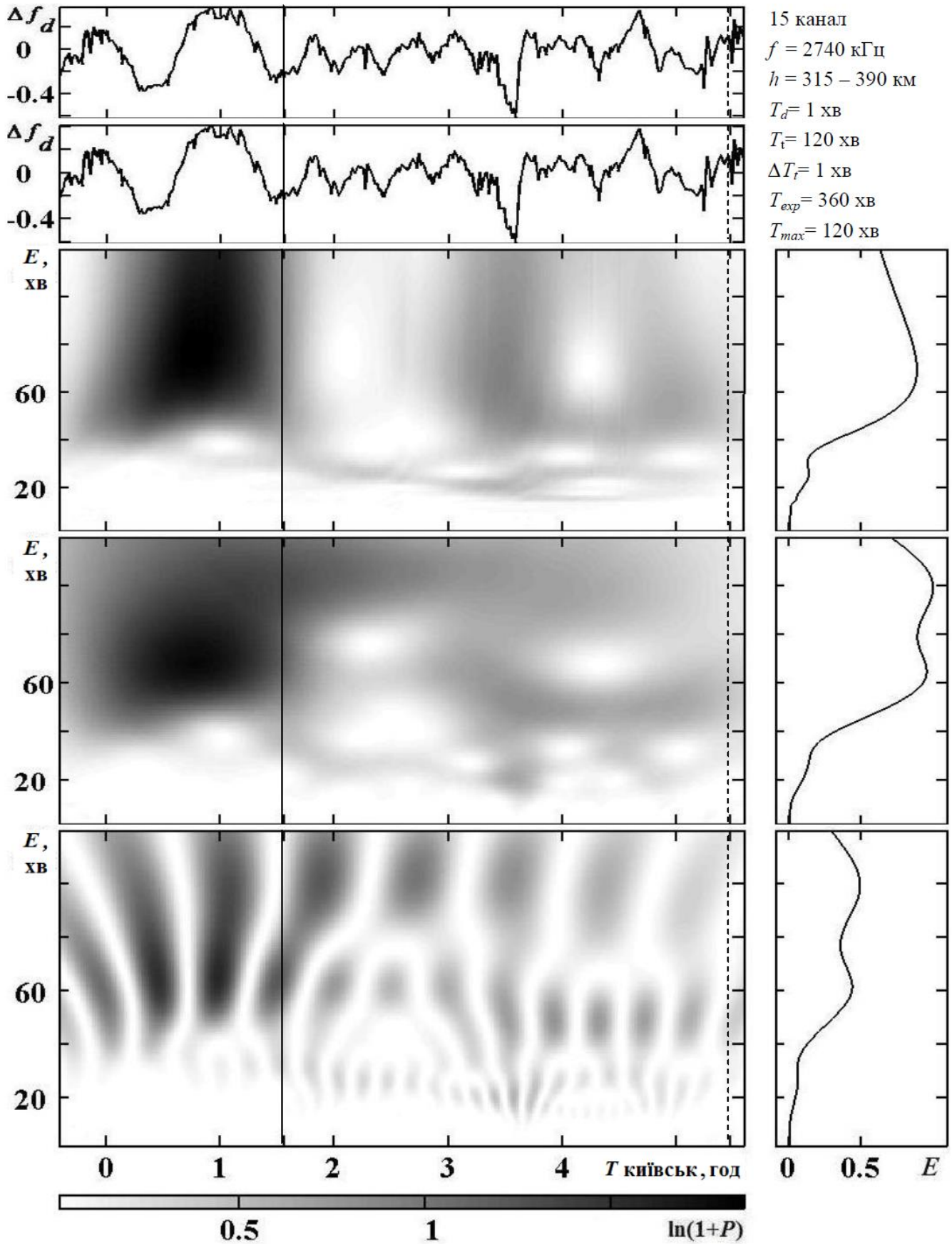


Рис А.10. Результати спектрального і вейвлет аналізу ДС частоти за 16 лютого 2021 р. супроводжували CP Zenith 3SL (Платформа для морського CP). Момент CP показаний суцільною, а момент BC на висоті 450 км – пунктирною лінією.

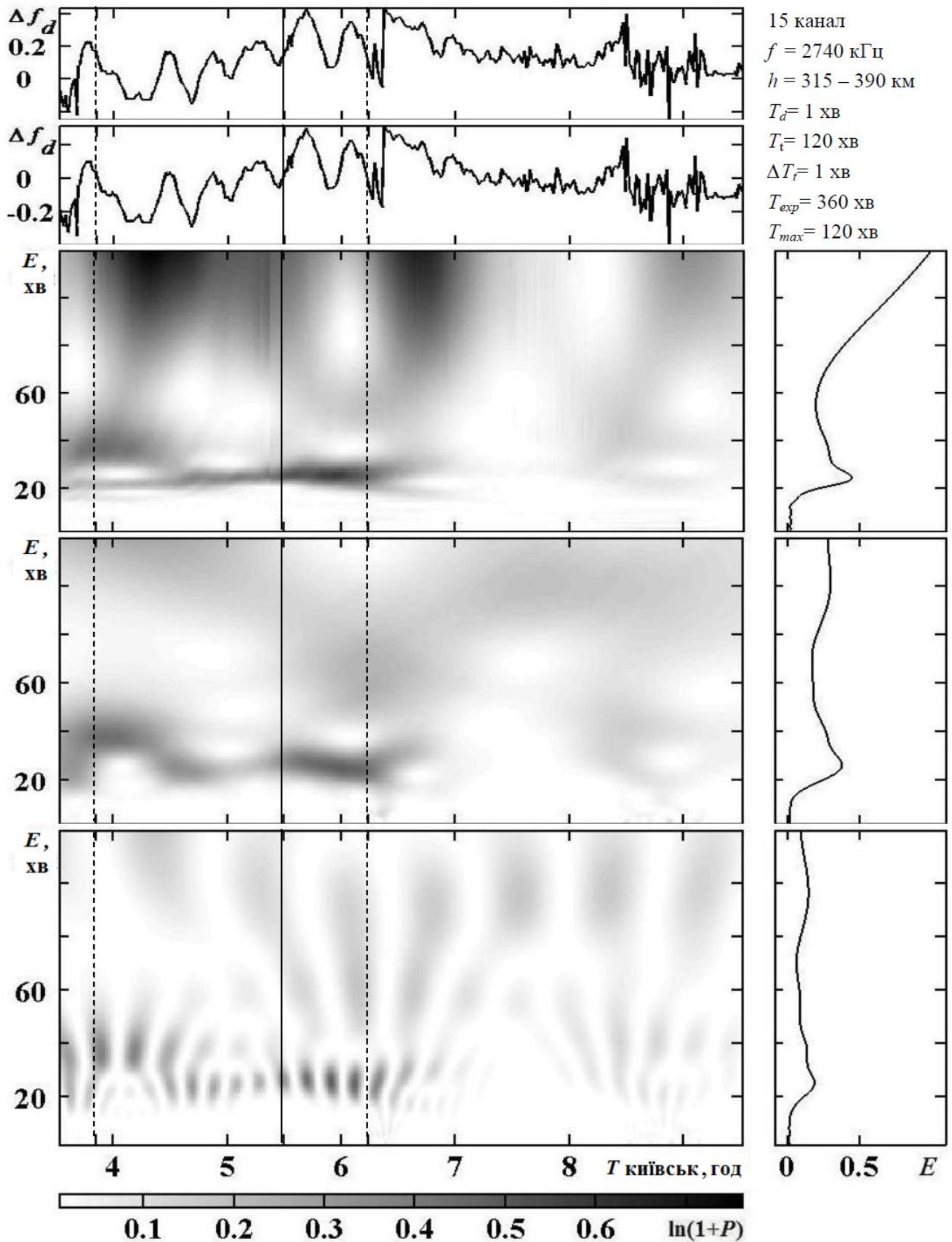


Рис. А.11. Результати спектрального та вейвлету аналізу ДС частоти для 30 березня 2021 р. супроводжували СР Союз ФГ (Байконур). Момент СР показаний суцільною, а момент НД на висотах 450 км та 0 км – пунктирною лінією.

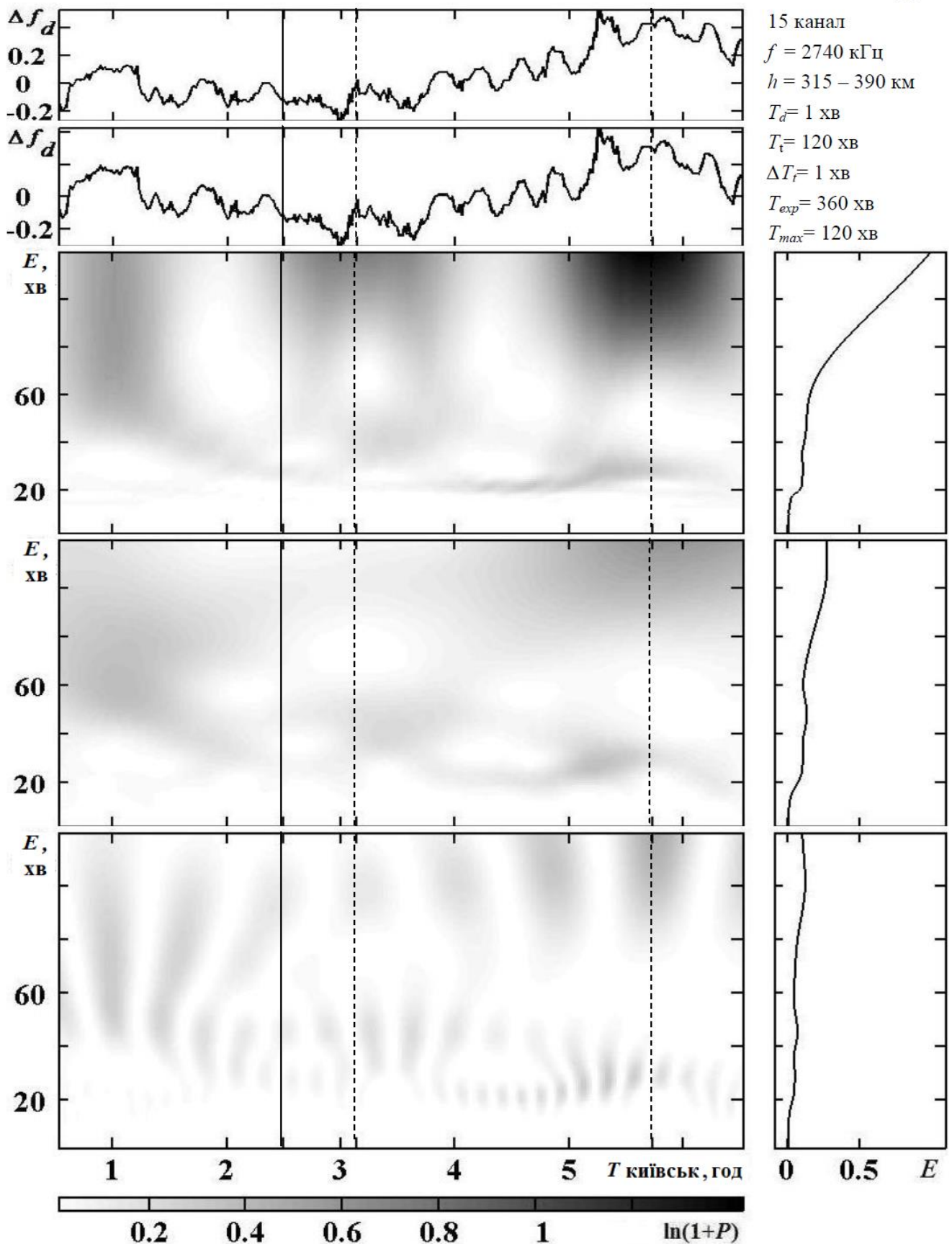


Рис А.12. Результати спектрального та вейвлету аналізу ДС частоти для 13 квітня 2021 р. супроводжували CP Zenith 3SL (Платформа для морського CP). Момент CP показаний суцільною, а момент НД на висотах 450 км та 0 км – пунктирною лінією.

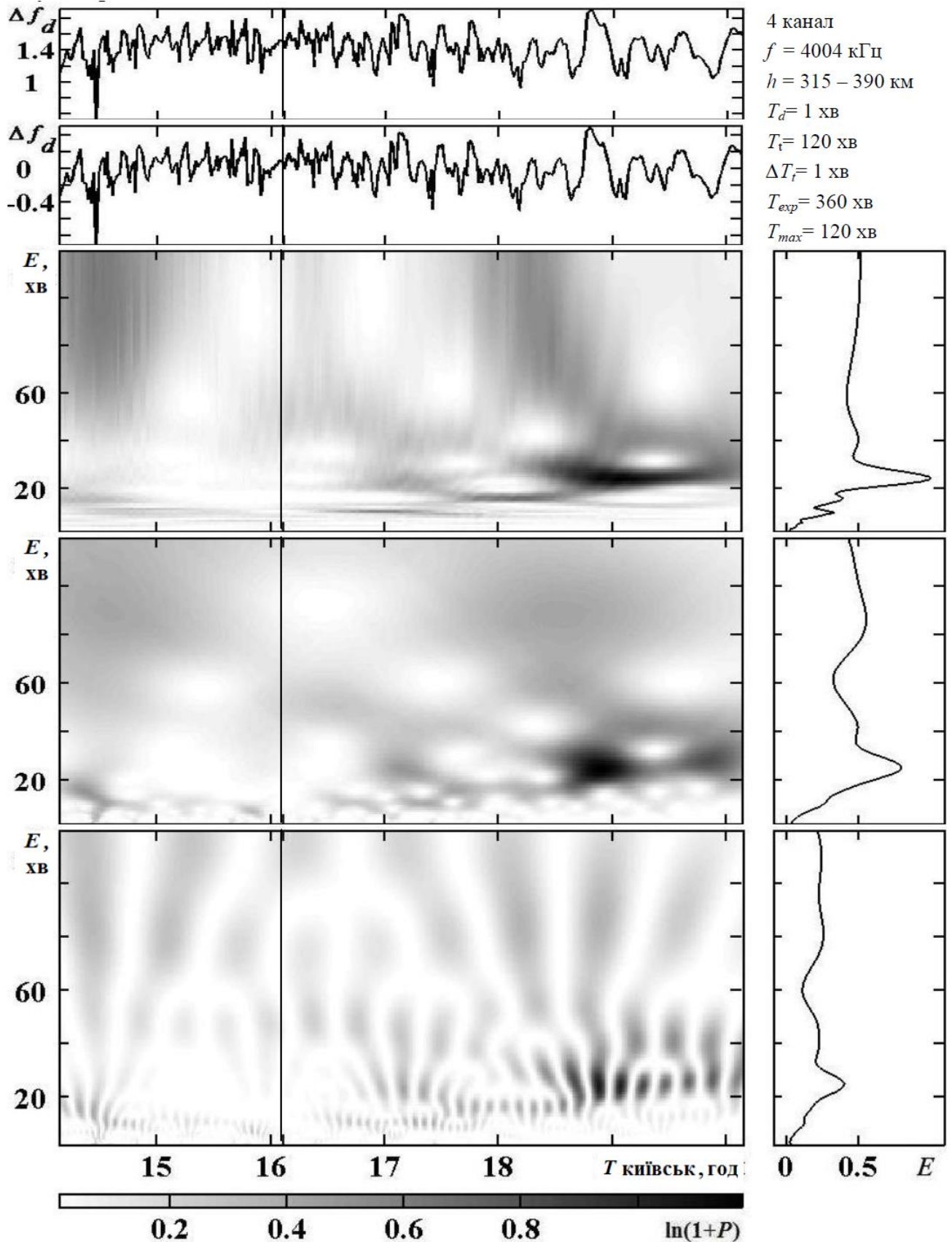


Рис А.13. Результати спектрального та вейвлету аналізу ДС частоти для 17 липня 2021 р. супроводжували CP Discovery (мис Канаверал). Момент CP показаний суцільною лінією.

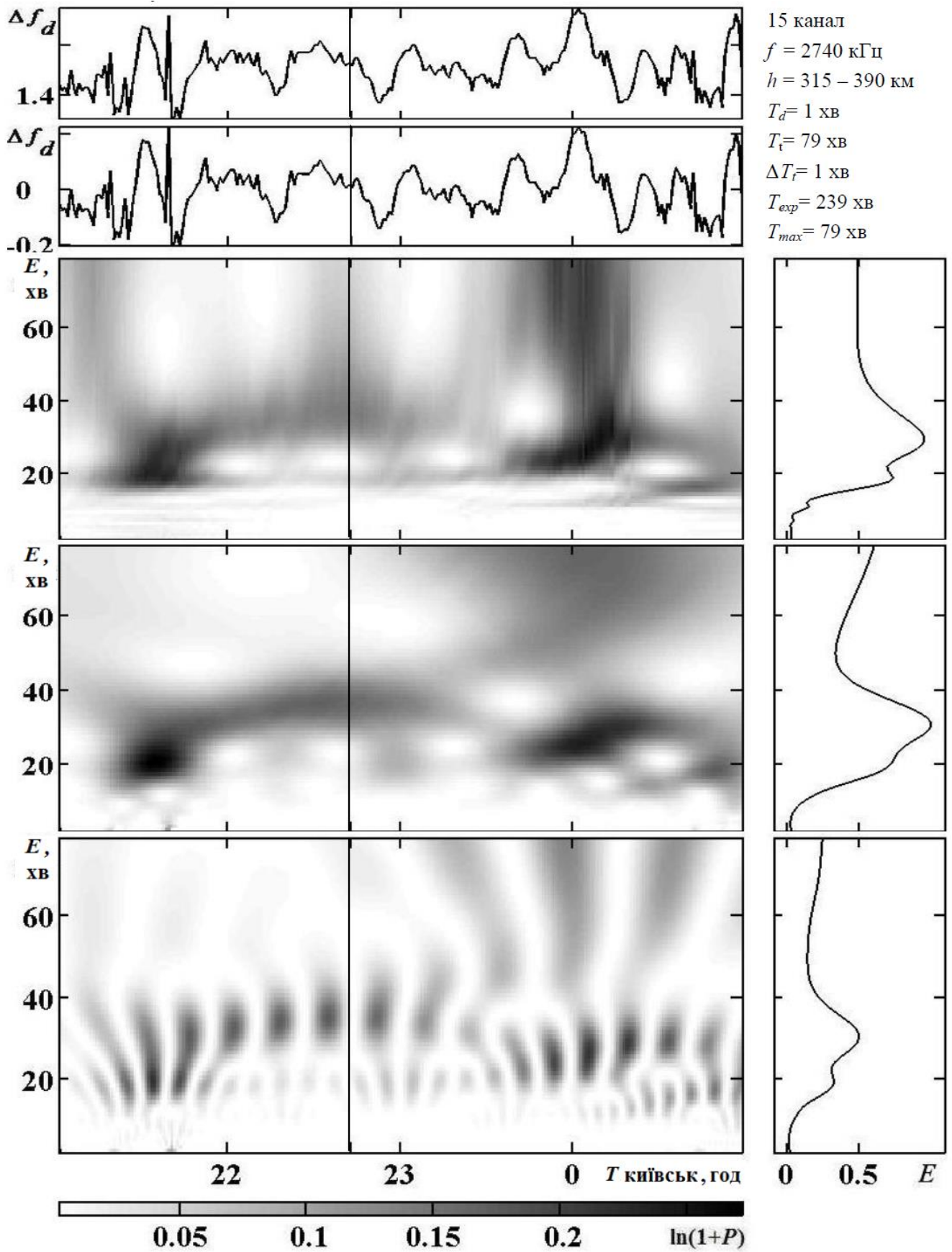


Рис. А.14. Результати спектрального та вейвлету аналізу ДС частоти для 26 липня 2021 р. супроводжували СР Dniepr (Байконур). Момент СР показаний суцільною лінією.

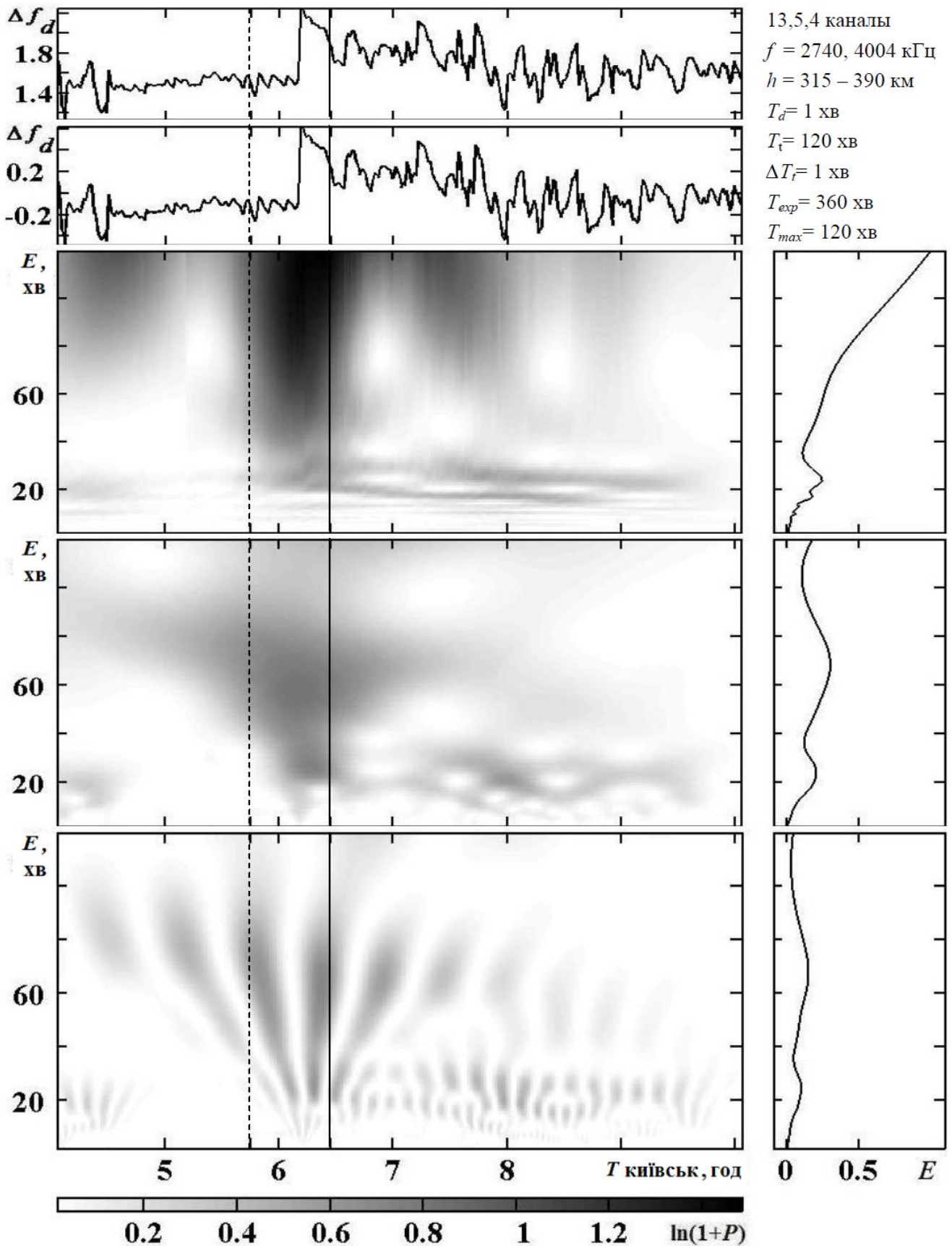


Рис А.15. Результати спектрального та вейвлету аналізу ДС частоти для 22 серпня 2021 р. супроводжували CP Zenith 3SL (Платформа для морського старту). Момент CP показаний суцільною, а момент НД на висоті 0 км - пунктирною лінією.

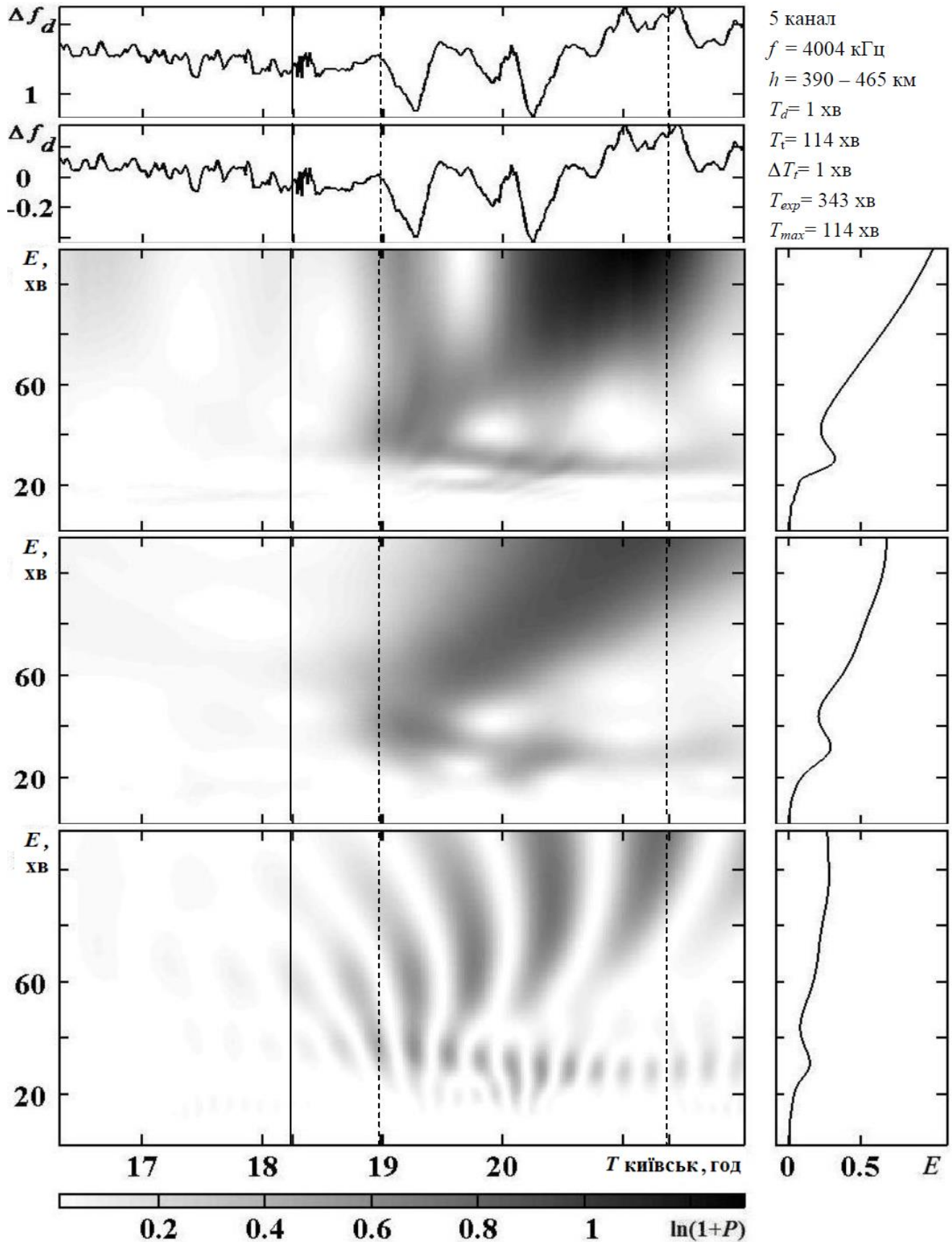


Рис А.16. Результати спектрального та вейвлету аналізу ДС частоти для 9 вересня 2021 р. супроводжували СР Atlantis (мис Канаверал). Момент СР показаний суцільною, а момент ЗС на висотах 0 км та 450 км – пунктирною лінією.

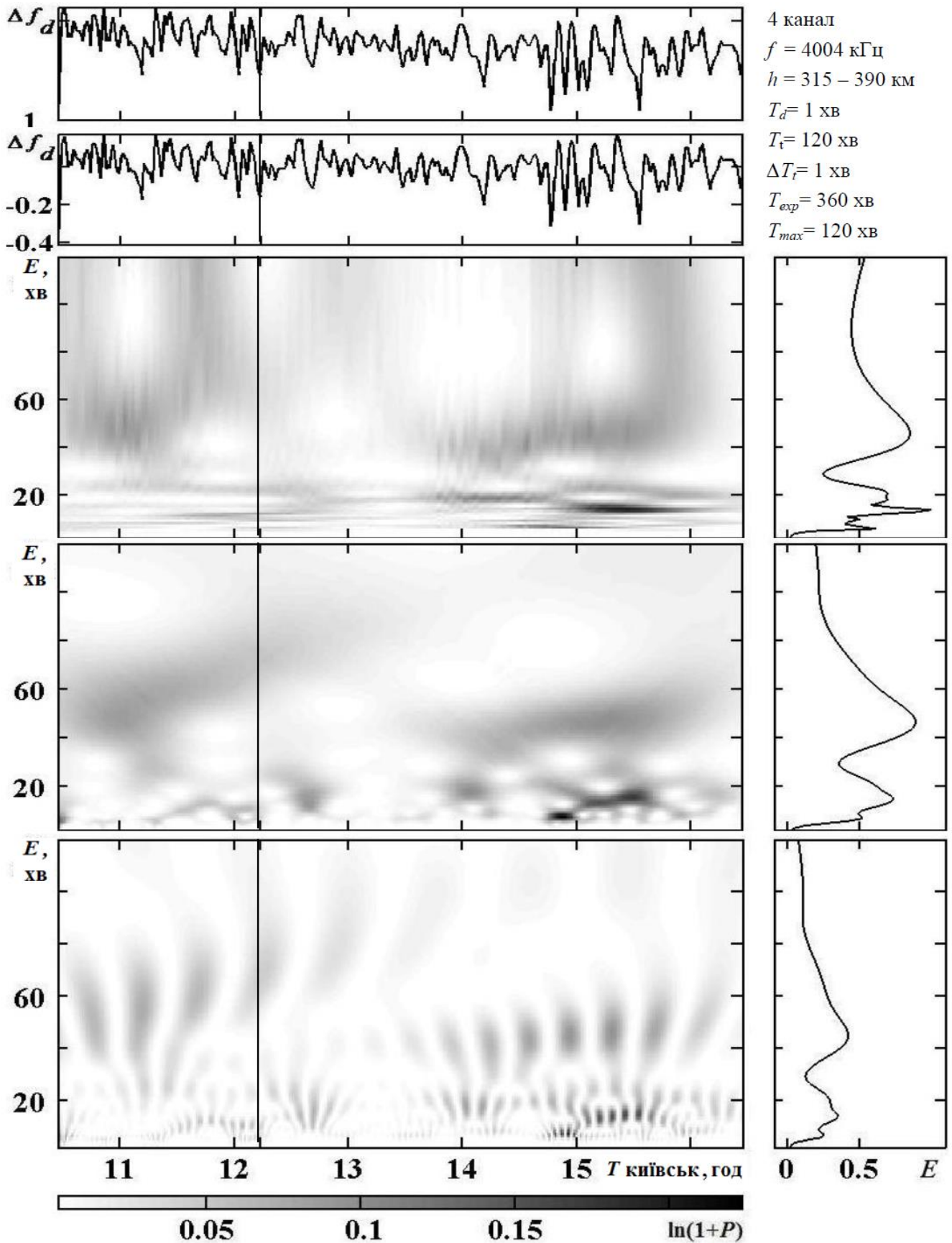


Рис А.17. Результати спектрального та вейвлет аналізу ДС частоти для 21 вересня 2021 р. супроводжували СР Atlantis (мис Канаверал). Момент СР показаний суцільною лінією.

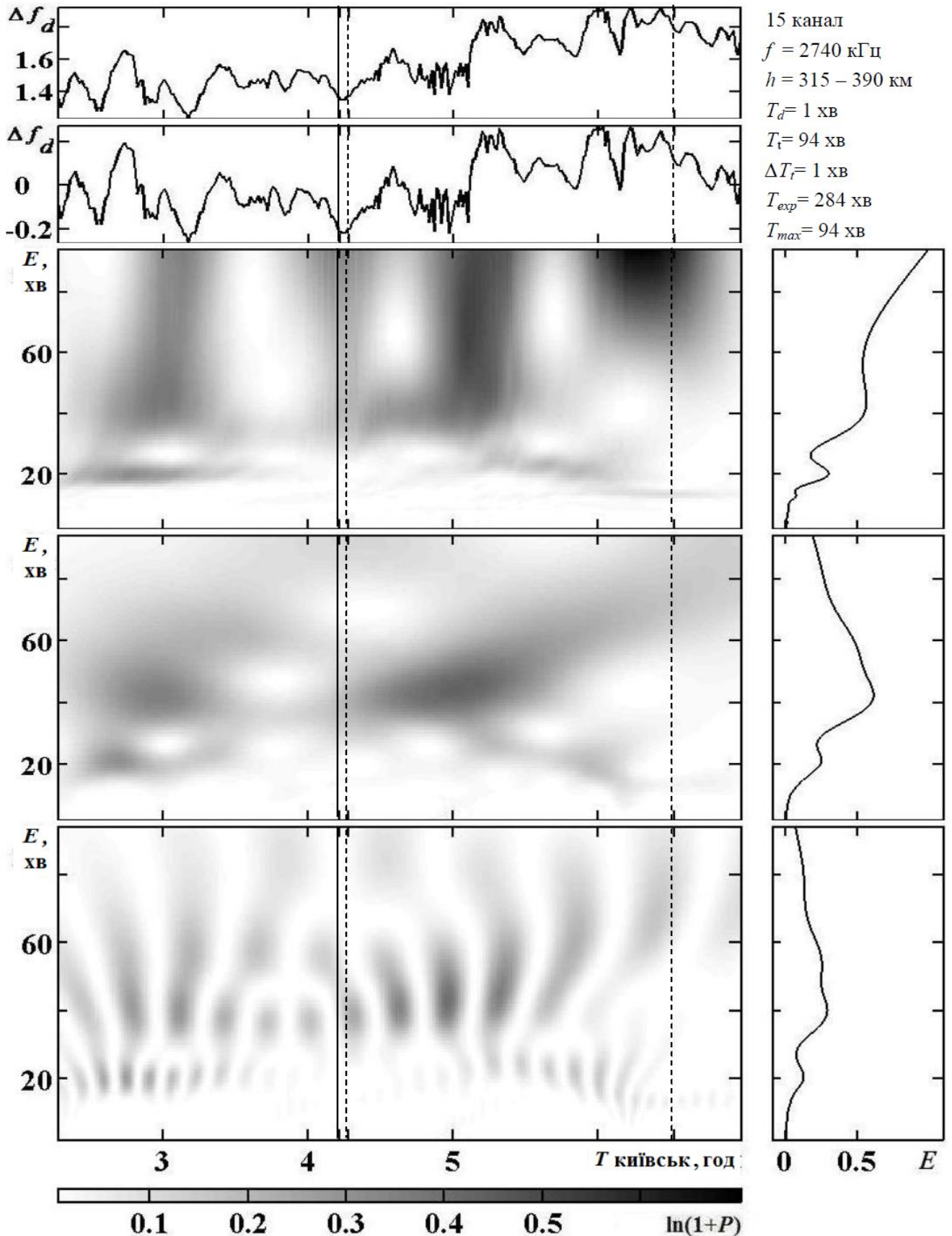


Рис А.18. Результати спектрального та вейвлету аналізу ДС частоти для 29 вересня 2021 р. супроводжували СР Союз ТМА (). Момент СР показаний суцільною, а момент НД на висотах 450 км та 0 км – пунктирною лінією.

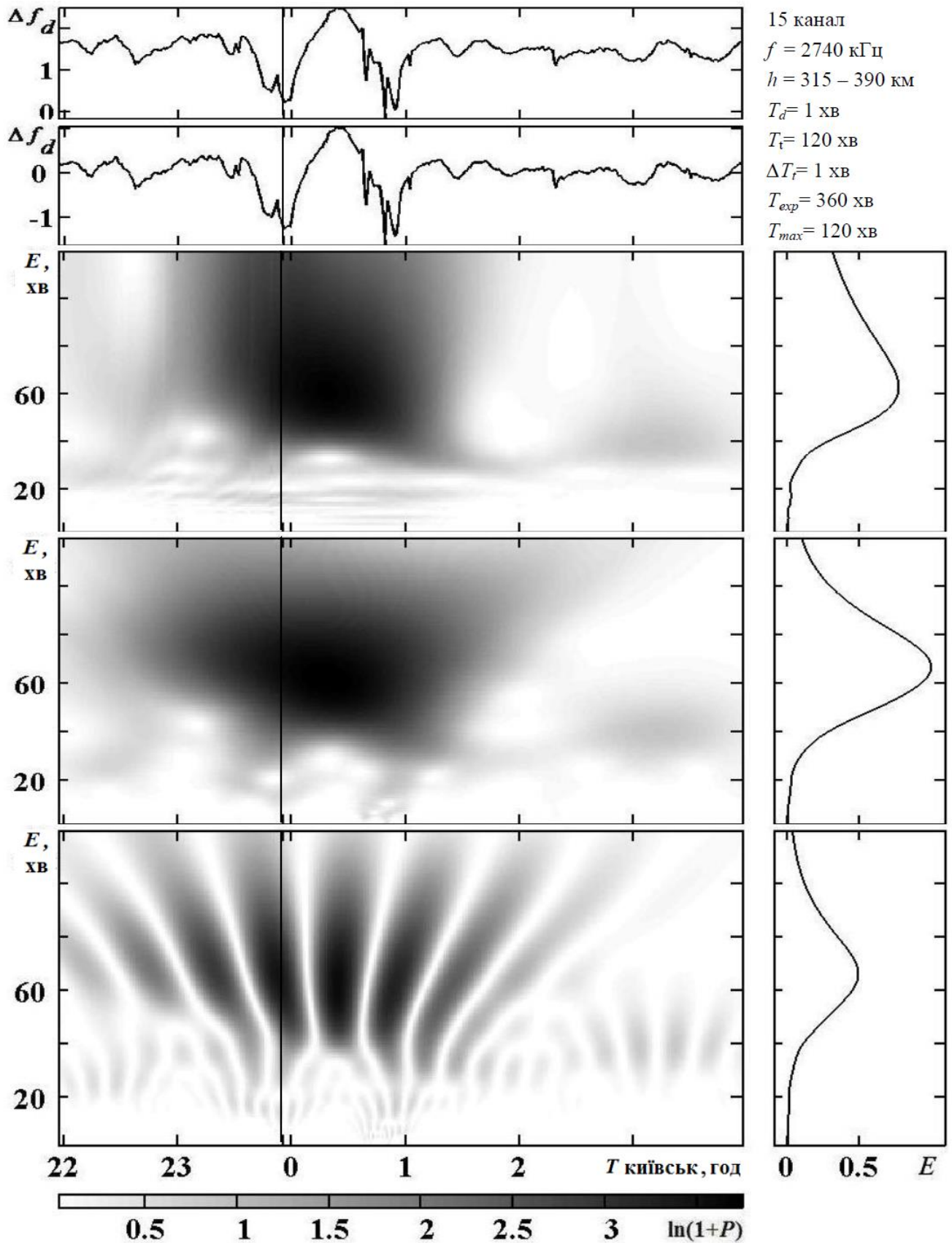


Рис А.19.. Результати спектрального та вейвлету аналізу ДС частоти для 13 жовтня 2021 р. супроводжували СР Ariane 5 (Куру). Момент СР показаний суцільною лінією.

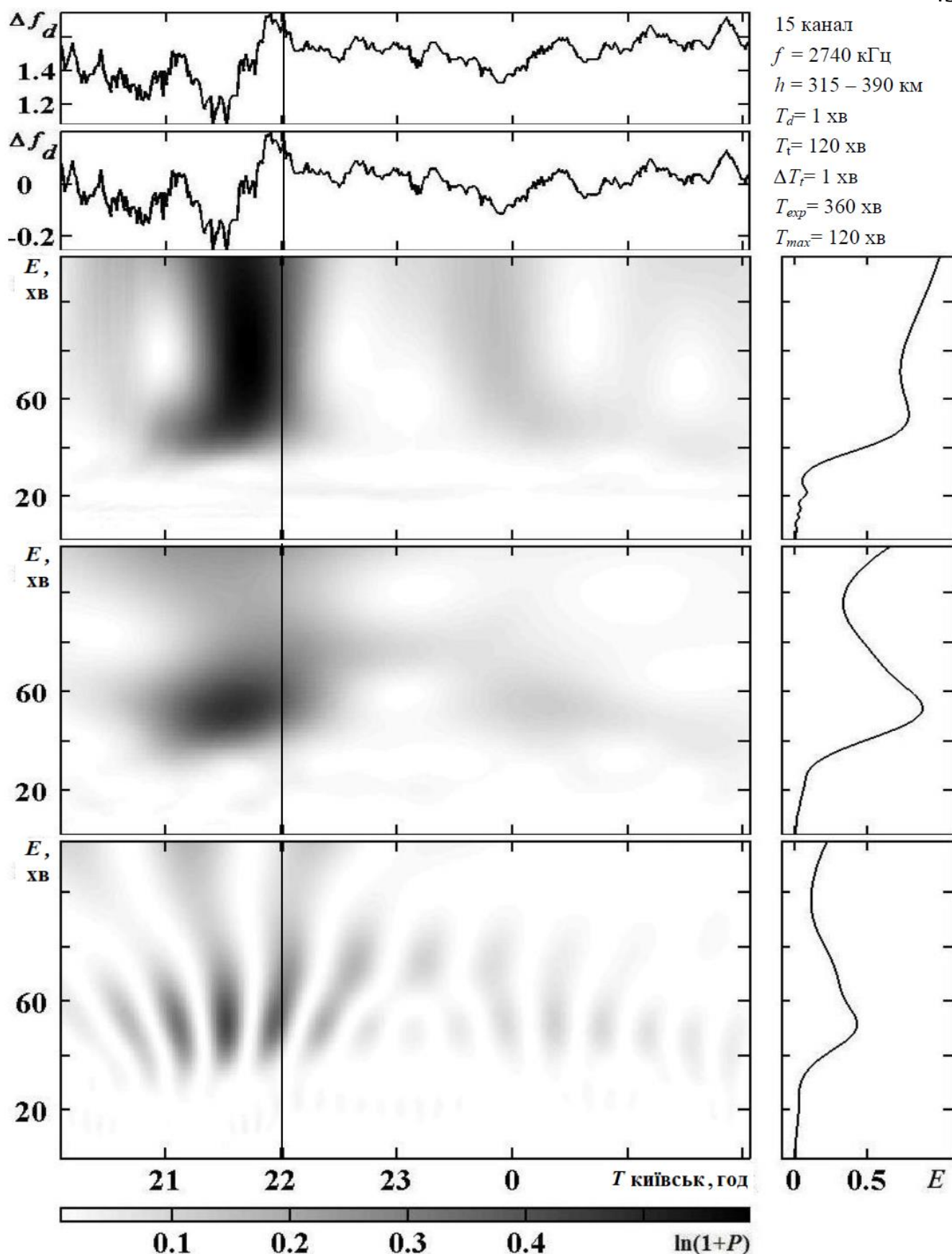


Рис. А.20. Результати спектрального та вейвлету аналізу ДС частоти для 8 листопада 2021 р. супроводжували СР Proton М (Байконур). Момент СР показаний суцільною лінією.

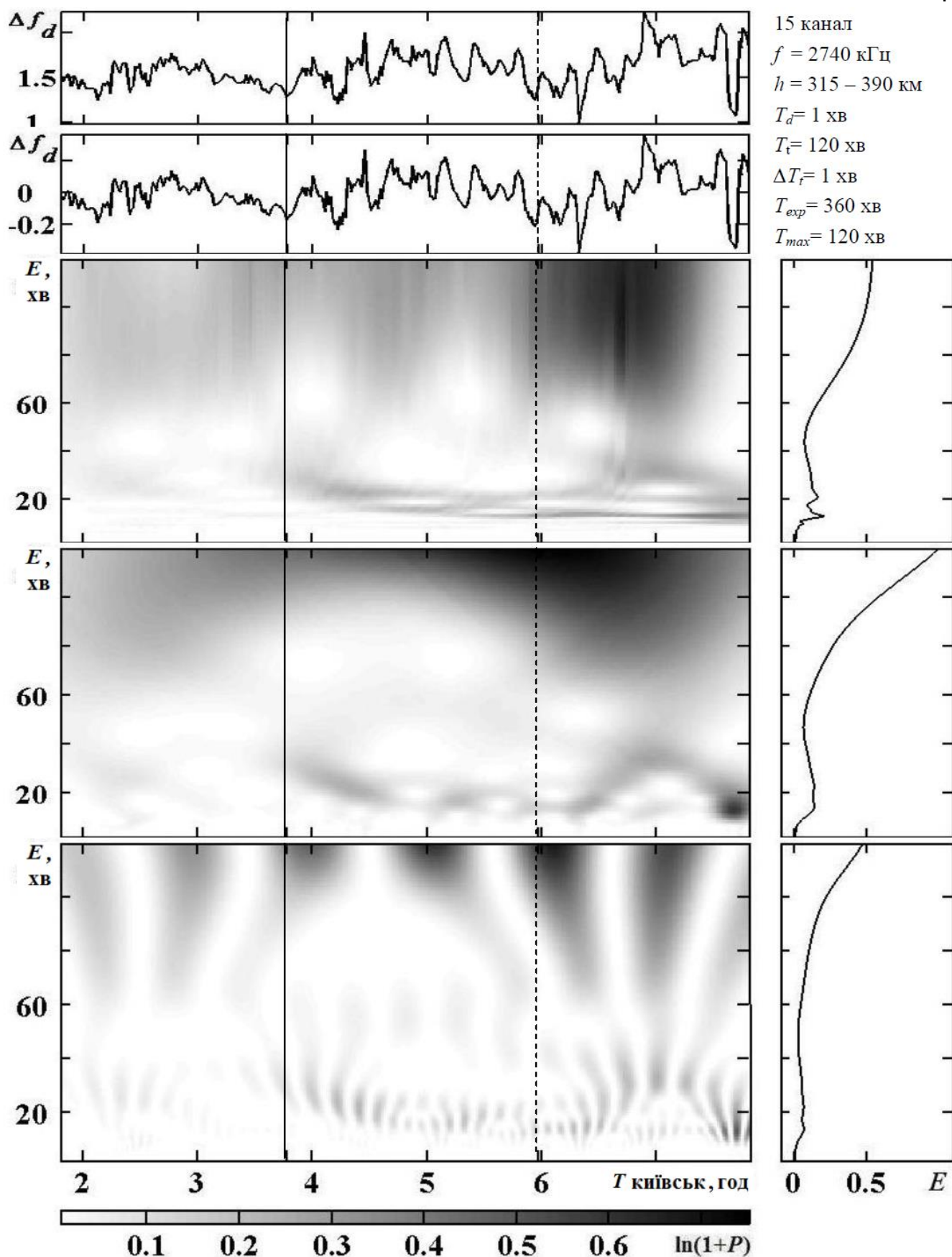


Рис А.21. Результати спектрального та вейвлету аналізу ДС частоти для 10 грудня 2021 р. супроводжували CP Discovery (Мис Канаверал). Момент CP показаний суцільною, а момент НД на висоті 450 км – пунктирною лінією.

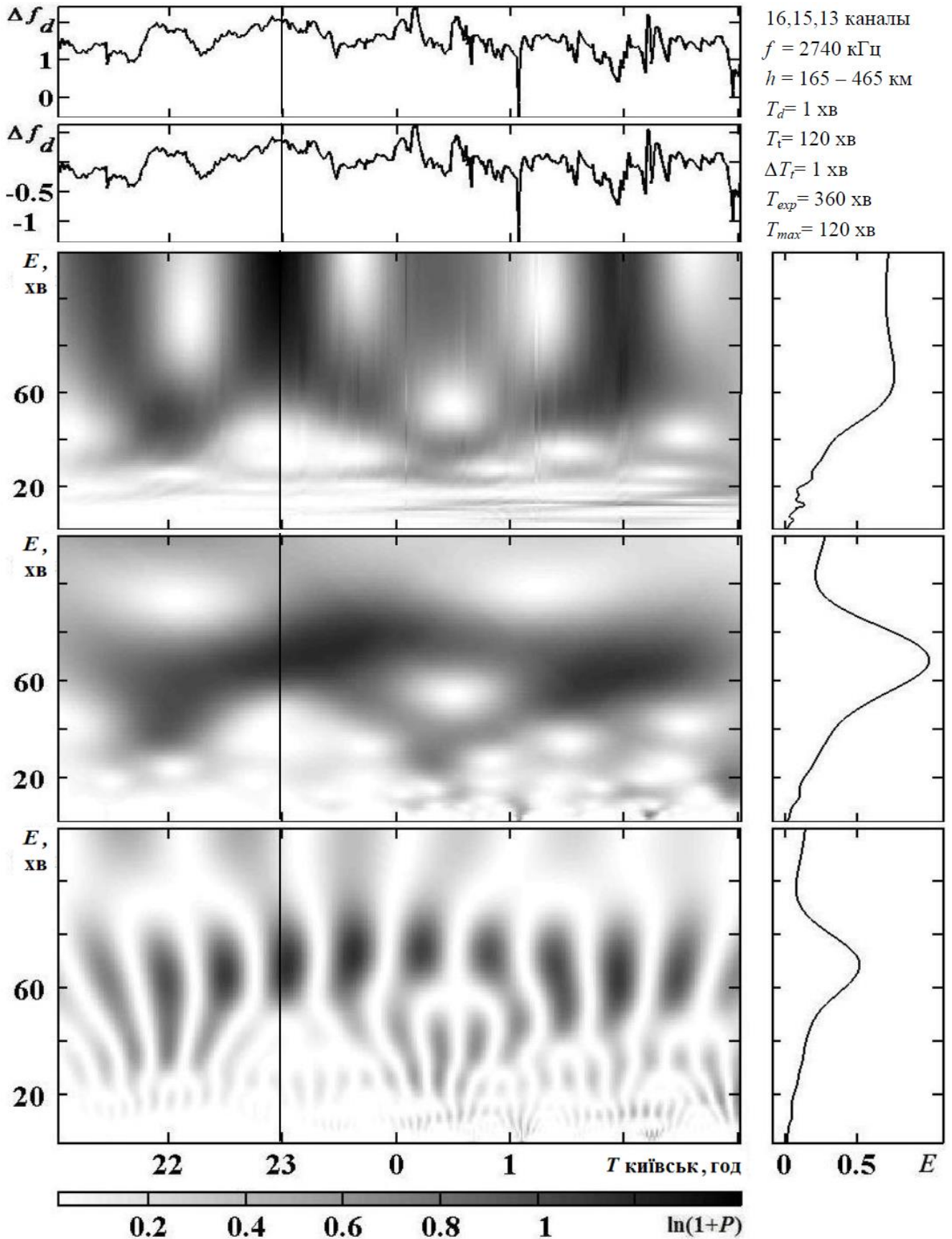


Рис А.22. Результати спектрального та вейвлету аналізу ДС частоти для 14 грудня 2021 р. супроводжували CP Delta 2 (Вандербенг). Момент CP показаний суцільною лінією.

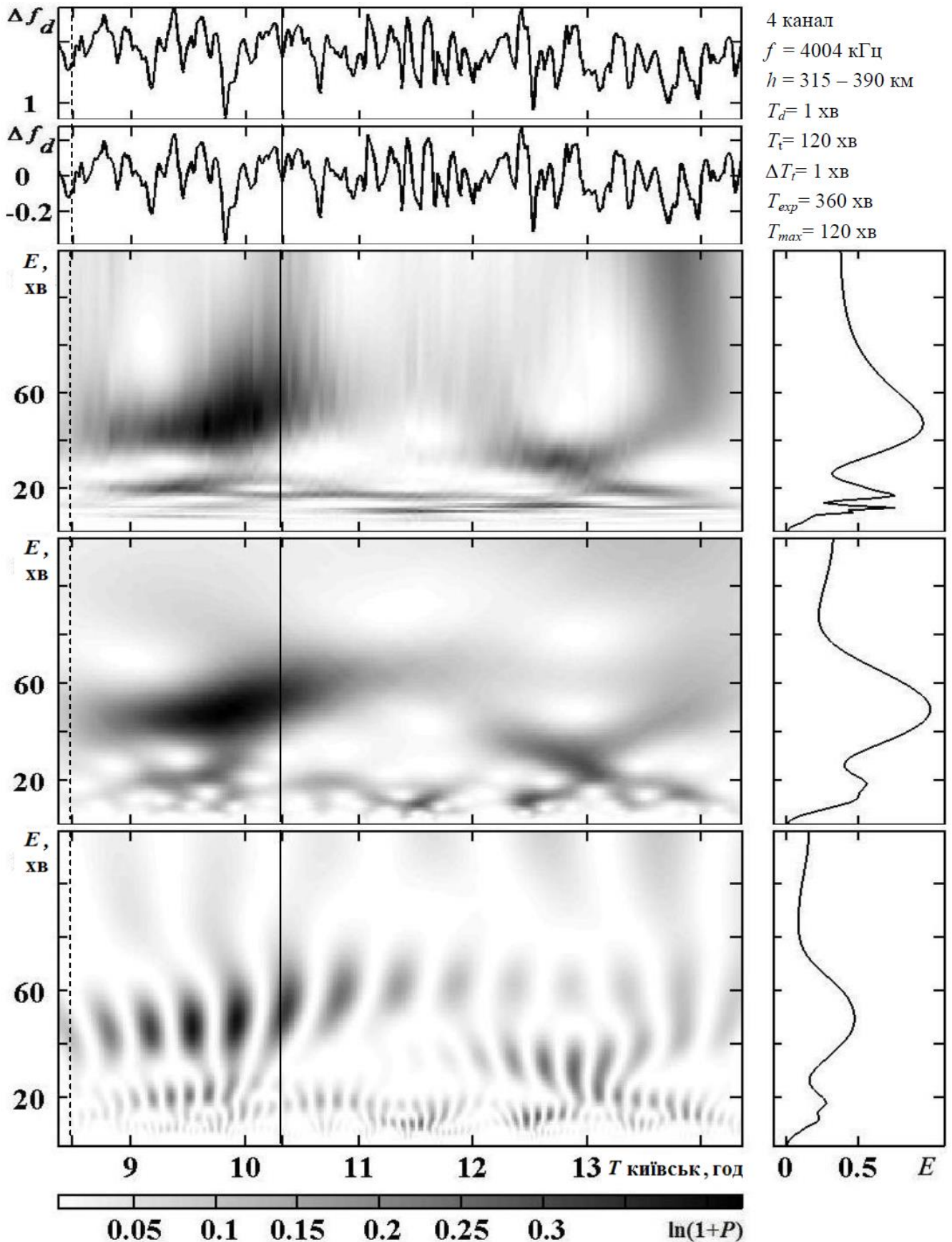


Рис А.23. Результати спектрального та вейвлет аналізу ДС частоти для 21 грудня 2021 р. супроводжували СР РС-20В (Оренбург). Момент СР показаний суцільною лінією, а момент НД на висоті 0 км - пунктирною лінією.

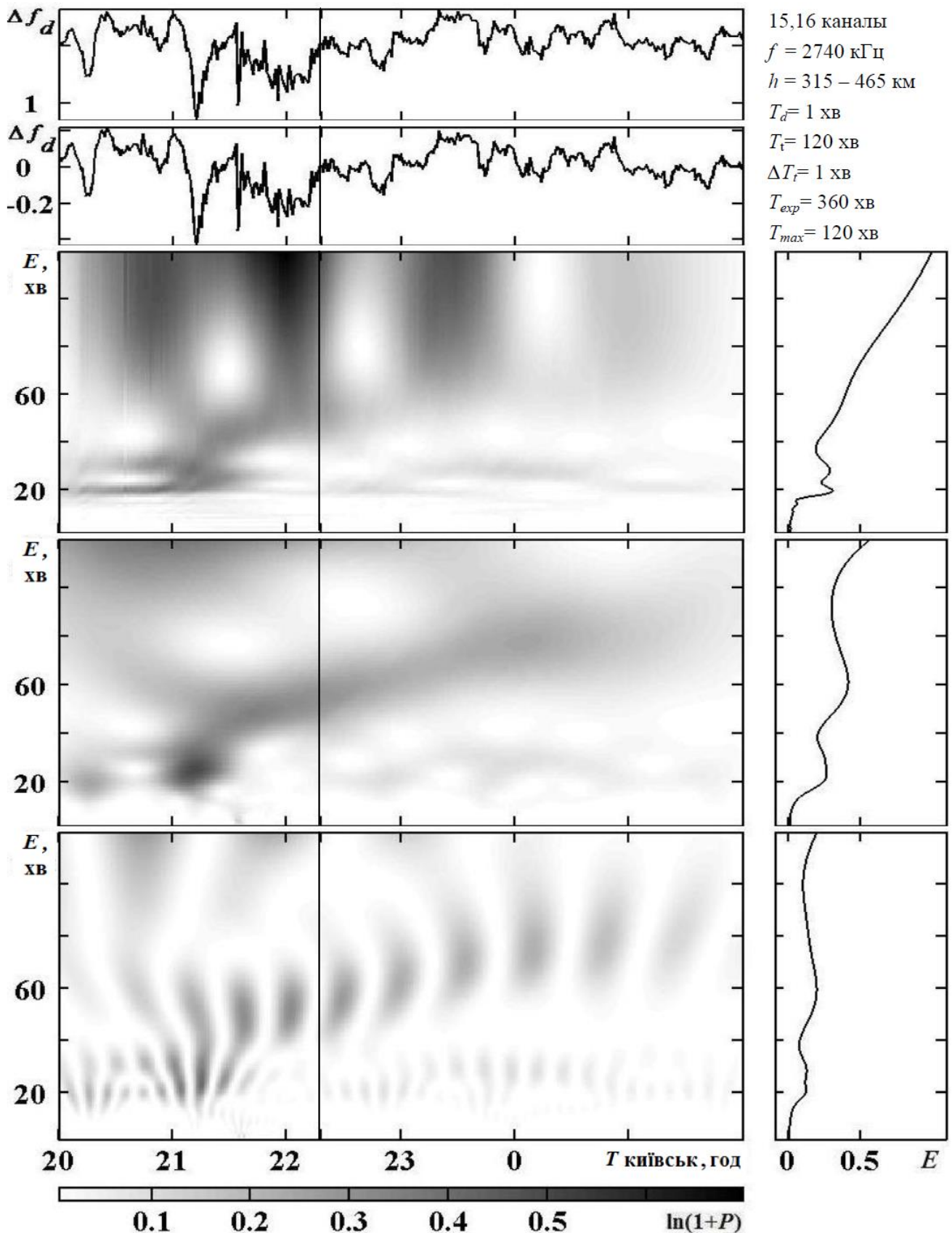


Рис А.24.. Результати спектрального та вейвлету аналізу ДС частоти для 25 грудня 2021 р. супроводжували СР Proton К (Байконур). Момент СР показаний суцільною лінією.

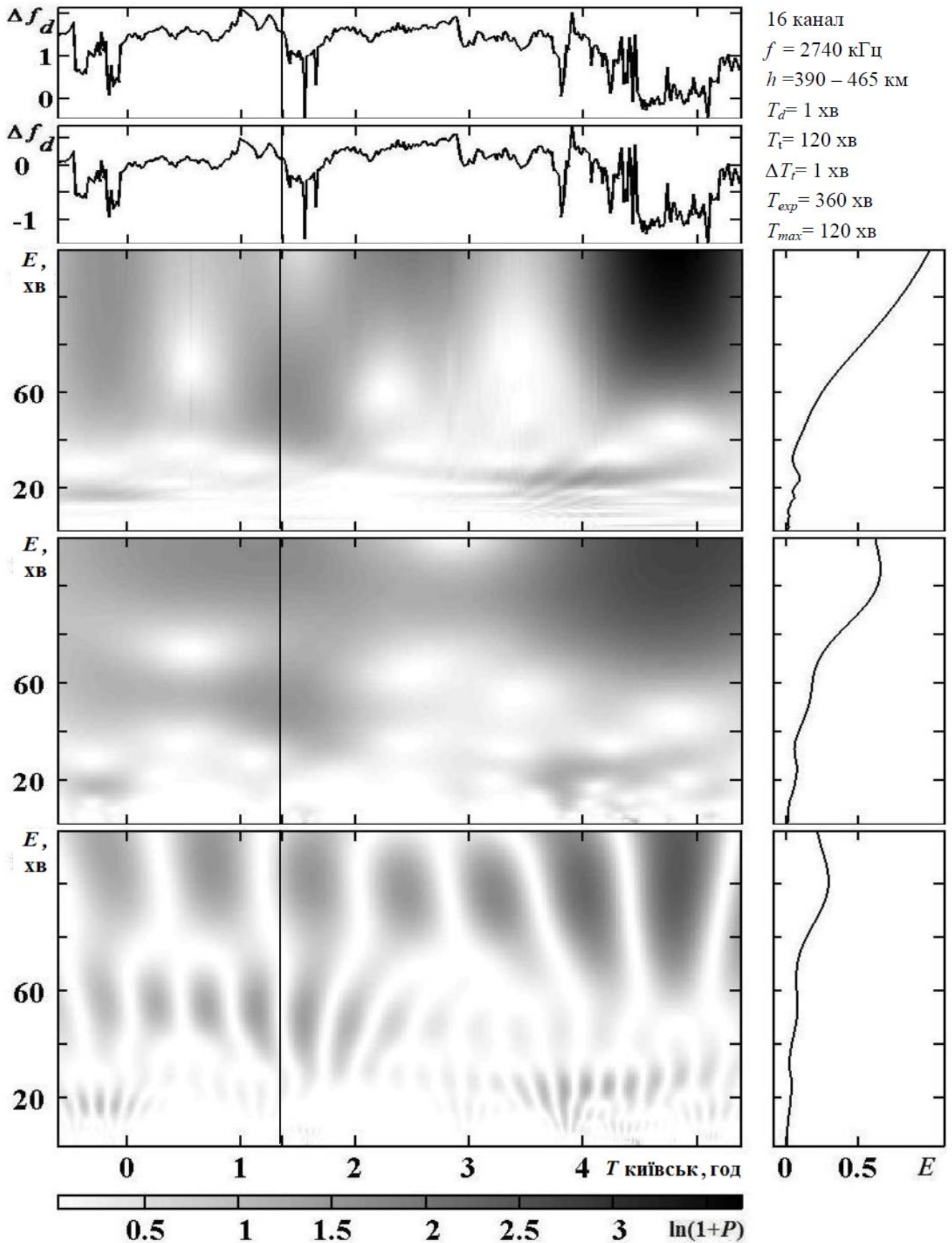


Рис А.25. Результати спектрального та вейвлету аналізу ДС частоти для 31 січня 2022 р. супроводжували CP Zenith 3SL (Платформа для морського старту). Момент CP показаний суцільною лінією.