

© Ю.М. Головка<sup>1</sup>, О.М. Шашенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

## ПРО ОБЧИСЛЕННЯ ПРОГНОСТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ГАЗОДИНАМІЧНИХ ЯВИЩ ЗА СПЕКТРАМИ СЕЙСМОАКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ

© Yu. Golovko<sup>1</sup>, O. Shashenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

## ON THE CALCULATION OF FORECASTING PARAMETERS OF GAS-DYNAMIC PHENOMENA FROM SPECTRA OF SEISMO-ACOUSTIC SIGNALS

**Мета.** Дослідження можливих вад процедури обчислення нормативно прийнятих прогностичних параметрів поточного прогнозу газодинамічних явищ у шахтах за спектральними характеристиками сейсмоакустичних сигналів, що обумовлені дією породоруйнівних механізмів на вибій.

**Методика.** Проаналізовані дослідження, що були основою для встановлення існуючої процедури обчислення прогностичних параметрів. Виконане комп'ютерне моделювання кривих спектрів та обчислення за ними прогностичних параметрів. Проведена оцінка відповідності між значеннями параметрів і виглядом спектральних кривих.

**Результати.** Показана спорідненість методів прогнозу з використанням аналогової апаратури і процедурами отримання чисельних значень прогностичних параметрів.

Детально розглянута нормативно прийнята процедура обчислення прогностичних параметрів, що впроваджена на більшості викидонебезпечних шахт України. Встановлено, що дана процедура, принаймні в окремих випадках, не спроможна відобразити перерозподіл спектру і може приводити до суперечливих значень шуканих параметрів.

Досліджена можливість використання для формування прогностичних параметрів квантилів кумулятивної функції спектру. Показано, що зміни квантилей адекватно відображають зміни форми та зміщення спектрів

**Наукова новизна.** Доведена наявність нестійких спектрів сейсмоакустичних сигналів, що до значень прийнятих прогностичних параметрів. Встановлено, що обчислені за прийнятою процедурою прогностичні параметри можуть не відображати реальні зміни спектру сигналу і, відповідно, бути помилковими. Запропоновано будувати прогноз небезпечного стану на підставі квантилів спектру сейсмоакустичних сигналів.

**Практична значимість.** Результати дослідження можуть бути використані для корегування алгоритму обчислень прогностичних параметрів за існуючою процедурою, та вдосконалення методології прогнозу завдяки використанням квантильних оцінок спектрів.

**Ключові слова:** прогноз ГДЯ, спектральне оцінювання, коефіцієнт викидонебезпеки, квантилі.

**Вступ.** Раптові викиди вугілля та газу є найбільш катастрофічною різновидністю газодинамічних явищ (ГДЯ) у вугільних шахтах, що можуть призводити до аварій з великими збитками і нерідко супроводжуються травмами і навіть смертю шахтарів.

Імовірність викидів вугілля, породи та газу враховується на усіх стадіях розробки вугільних пластів. Але при відпрацюванні пластів вугілля та проведенні підготовчих виробок існує велика вірогідність зустрічі ділянок порід з фізико-механічними характеристиками, що суттєво відрізняються від характеристик переважаючих порід. При цьому умови сприятливі розвитку ГДЯ можуть бути обумовлені саме цими, заздалегідь непередбаченими, змінами, що на практиці проявляється у зональному характері викидів.

Поточні методи контролю стану виробок і прогнозу небезпеки призначені, перш за все, для попередження про підвищену можливість розвинення ГДЯ у прив'язці до поточного стану виробки. Прогноз, безперечно, повинен узагальнювати комплекс величин, що можуть вимірюватися чи оцінюватися (напружений стан в околі виробок, тиск та склад газу у вугіллі та у виробці, фізико-механічні та фізико-хімічні властивості вугілля, тощо). Серед методів, що при цьому використовуються, переваги саме сейсмоакустичних методів в значній мірі обумовлені оперативністю та можливістю використання без зупинки технологічних процесів. Ці властивості обумовлюють їхню функцію «першого сигналу» про небезпеку.

Розрізняють активні і пасивні сейсмоакустичні методи.

Пасивні методи ґрунтуються на реєстрації природних мікросейсмічних сигналів та сигналів акустичної емісії, що спонтанно виникають в результаті геодинамічних процесів у гірській породі. Відповідно розташування і характеристики джерел коливань наперед невідомі. Сигнали суттєво нестаціонарні, мають вигляд імпульсів чи хвильових пакетів. Інформація, що може бути отримана з аналізу зареєстрованих сигналів, стосується, перш за все, процесів руйнування (тріщиноутворення, розриви, зсуви). При використанні мережі сеймоприймачів на основі аналізу часу прибуття хвиль та їх характеристик можлива побудова зображень внутрішньої структури гірничих порід та виявлення зон підвищеного напруження (пасивна томографія).

Активні методи визначаються використанням штучно створених джерел пружних хвиль, які впливають спрямовано на гірську породу або вугільний пласт. Це можуть бути вибухи, удари молота, вібратори чи спеціальні пристрої, що створюють вібрацію чи акустичні імпульси. Відповідно локація і, принаймні, деякі характеристики джерел наперед відомі.

Чинний в Україні галузевий стандарт [1] допускає поточне прогнозування викидонебезпеки, ґрунтуючись на сейсмоакустичних сигналах

- за акустичною емісією (АЕ) вугільного масиву;
- за параметрами акустичного сигналу (ПАС);
- за амплітудно-частотними характеристиками (АЧХ) акустичного сигналу.

Прогноз за АЕ відноситься до пасивних сейсмоакустичних методів і будується за кількістю імпульсів, зареєстрованих за одиницю часу (активність). Складнощі використання пов'язані з виділенням природної мікросейсмічної активності під час роботи технологічного обладнання та машин. Тому найбільш коректні дані можуть бути отримані протягом технологічних пауз, коли робота породоруйнівних механізмів призупинена. Крім того, природна сейсмоактивність окремих пластів відрізняється на порядки, що суттєво ускладнює використання узагальнених критичних значень.

Обидва інші види прогнозу (за АЧХ і за ПАС) відносяться до активних методів, а у якості джерел сейсмоакустичних сигналів виступають породоруйнівні машини і механізми. Також в обох випадках прогноз небезпечного стану базується на частотних характеристиках реєстрованих сигналів. У випадку прогнозу за АЧХ їх називають «амплітудно-частотними характеристиками», а у випадку ПАС «спектром».

Переваги цих методів зростають зі збільшенням глибини добування в силу того, що у більшості випадків одночасно з збільшенням глибини посилюються пластичні властивості порід. При цьому, зменшуються, або навіть зовсім не виявляються, сигнали акустичної емісії. Відповідно зменшуються можливості прогнозу ГДЯ за АЕ.

Протиставляти два спектрально орієнтовані методи прогнозу з прогнозом за АЕ не доречно, враховуючи суттєво різне розташування джерел, природу виникнення, часові проміжки виникнення і області розповсюдження коливань. Коли мова стосується прогнозу стану в околі виробки обидва підходи взагалі можуть використовуватися одночасно. При цьому, вочевидь, в часові проміжки роботи руйнівних механізмів перевагу треба віддати прогнозу за АЧХ і за ПАС, а в проміжках відносної тиші спостереженням АЕ. Привабливо, що в обох випадках може використовуватися одна й та ж сама апаратура, а відмінності зосереджується у методах обробки реєстрованих сигналів. Таким чином можливо мати безперервний сейсмоакустичний моніторинг.

Прогнози небезпеки за АЧХ і за ПАС використовуються на більшості викидонебезпечних шахт України вже багато років, однак якість прогнозу не може вважатися задовільною. За думкою спеціалістів доля помилок другого роду («хибна тривога») не менше 30 %. Доказово визначити рівень цього виду помилок складно, так як в більшості випадків при прогнозі «небезпечно» проводяться заходи щодо запобігання ГДЯ. Але, враховуючи економічні і емоційно-мотиваційні наслідки сумнівних зупинок виробничого процесу, навіть гіпотетична наявність такого роду помилок дає підстави для більш ретельного дослідження джерел можливих прогалин в методології прогнозування.

Предметом дослідження є саме процедура отримання прогностичних параметрів за імовірно коректно виміряними сигналами. Спроби обґрунтування методу викладені, наприклад, у роботах [2, 3] і у даній статті не розглядаються.

Ціль статті: дослідити можливі вади процедури обчислення нормативно прийнятих прогностичних параметрів поточного прогнозу ГДЯ за спектральними характеристиками сейсмоакустичних сигналів, що обумовлені дією породоруйнівних механізмів.

**Останні публікації та підґрунтя нормативно встановлених прогностичних параметрів.** Крім України викиди вугілля і газу є основним джерелом небезпеки на вугільних шахтах Китаю, США, Канади, Північної Африки, Австралії, Польщі, Росії, Казахстану. Для попередження ГДЯ використовується як пасивні, так і активні сейсмоакустичні методи. Загальні тенденції полягають у використанні мережі сейсмоприймачів з централізованою обробкою та аналізом сигналів на поверхні. В більшості випадків використовуються технології

мікросейсмічного моніторингу: SOS (Central Mining Institute – National Research Institute, Poland), IMS (Institute of Mine Seismology, South Africa), ESG (Engineering Seismology Group, Canada), ARES-5/E (Institute of Innovative Technology EMAG, Poland).

Останні роки багато надій пов'язується з використанням машинного навчання. Ідеологія машинного навчання відповідає концепції формування прогнозу на підставі узагальненого гнучкого аналізу усіх наявних даних. При цьому сейсмоакустичні данні, ще й в силу оперативності їх отримання, мають першорядне значення [4, 5]. Алгоритм неперервно навчається та оптимізується і може враховувати усі можливі фактори, що підвищує надійність результатів. Але навчання можливе тільки при наявності досить великої бази випадків динамічних явищ з зафіксованими значеннями «усіх можливих факторів», що пов'язані з цими випадками. Враховуючи рідкість прецедентів та невизначеність системи факторів, побудова такої бази є проблемою і інформація про спроби її створення відсутня. Публікації обмежуються розробкою різноманітних алгоритмів [6, 7], які в багатьох випадках передбачають долучати до факторів прогностичні параметри існуючих сейсмоакустичних методів [4, 7, 8].

Дослідження, що пов'язані з застосуванням сейсмоакустичних методів у шахтах, направлені на: підвищення точності місця розташування сейсмічних джерел [9, 10], узгодженого функціонування наземної та підземної систем сеймоприймачів [11], сполучення даних з іншими геофізичними методами [12], підвищення оперативності пасивної томографії [13], з'ясування можливостей волоконно-оптичного розподіленого акустичного зондування (DAS) [11].

Разом з тим методи прогнозування динамічних явищ на підставі спектральних параметрів акустичних сигналів, що виникають при впливі на забій породоруйнівних механізмів, використовуються тільки у країнах минулого СРСР, залишаючись поза увагою дослідників інших країн навіть у оглядових публікаціях [14, 15]. Спектральний аналіз використовується, але тільки для фільтрації та класифікації відрізків сигналу стосовно типу хвиль [16, 17]. Причина, можливо, полягає в тому, що в інших країнах глибина вугільних пластів була порівняно мала і емісійна активність задовольняла вимогам пасивних методів. Можна очікувати, що зі збільшенням глибин добування, потреба в методах подібних методам прогнозуванню за АЧХ і ПАС буде зростати.

Всім методам та засобам, що пов'язані з забезпеченням безпеки людей властивий консерватизм. Ще більше це стосується нових засобів забезпечення безпеки в шахтних умовах, де отримання експериментально доведених даних надзвичайно ускладнено, а впровадження супроводжується ризиком помилки з надто високою ціною. Цим обумовлена обмежена кількість відповідних досліджень, а отримані данні і вже впроваджені методи заслуговують ретельного вивчення і аналізу незалежно від часу їх появи.

Перші дослідження спектральних характеристик сейсмоакустичних сигналів в околі вугільних виробок, що генеровані руйнівними машинами і механізмами, відносяться до 70-років минулого сторіччя (Іванов-Шиц, 1976; Мірер, 1976; Горелик, 1976). Було експериментально встановлено, що у небезпечних

зонах спостерігаються зміни спектрів сейсмоакустичних сигналів. Визначення зон, як небезпечних, проводилося за діючими на той час нормативними методами або за фактичними подіями, що відбулися.

Проведені надалі співробітниками Дніпропетровського гірничого інституту більш детальні дослідження (Міреп та ін., 1987) дали підставу схематизувати амплітудно-частотні характеристики сигналів, що реєструються у виробках, незалежно від породоруйнівного джерела акустичного сигналу. А саме, прийняти, що крива осередненої АЧХ має три екстремуми. Причому, у небезпечних зонах амплітудні значення «високочастотних» складових (третій екстремум АЧХ) збільшуються, а «низькочастотних» складових (перший екстремум АЧХ) зменшуються. Частота ж середнього абсолютного екстремуму АЧХ практично залишається сталою. Відмічалось також збільшення мінливості АЧХ у небезпечних зонах.

Первинні експериментальні спостереження (Міреп та ін., 1987, 1988) були отримані з використанням звукоуправлявальної апаратури ЗУА-4. Сигнал передавався на поверхню та записувався на магнітну стрічку. Спектр отримувався шляхом багаторазового пропускання запису через виборчий підсилювач ИГУ60 з полоскою пропускання 30 Hz і вимірюванням вихідного сигналу стрілочним мілівольтметром ВЗ-33. Таким чином, аналіз і висновки будувалися на підставі амплітудних спектрів швидкості коливань з проміжками осереднення за частотою не менше 30 Hz і за часом не менше 4 с і не більше 5 хвилин.

В наступній роботі (Міреп та ін., 1988) було запропоновано виділяти низькочастотну і високочастотну частини сигналу, що можуть бути відокремлені фільтрами низької і високої частоти та охоплюють відповідно перший і третій екстремуми АЧХ. Причому вважалось, що положення середнього (абсолютного) екстремуму наперед відомо і лежить для однієї групи пластів на проміжку (400, 800) Hz, а для іншої на проміжку (250, 550) Hz. Осереднені (як за частотою, так і за часом) значення амплітуд виділених частин сигналу  $A_H$  і  $A_B$  утворюють прогностичний показник  $K_B = \frac{A_H}{A_B}$ . Стан «небезпечно» запропоновано визначати

при перевищенні  $K_B$  критичних значень  $K_B^*$ , що залежать від виду виробки та джерела коливань. Для очисного забою  $K_B^* = 3$  (комбайн, струг) або  $K_B^* = 1,5$  (відбійний молоток). Для забою підготовчої виробки:  $K_B^* = 3,5$ .

Для реалізації автоматичного прогнозу за запропонованим показником  $K_B$  була розроблена аналогова апаратура акустичного контролю АК-1. Було виготовлено п'ятдесят комплектів даної апаратури, що дозволило паралельно провести випробування в різних гірничо-геологічних і гірничо-технічних умовах шахт Донбасу і Караганди в виробничих об'єднаннях «Донецьквугілля», «Макеєввугілля», «Артемвугілля», «Краснодонвугілля» і «Карагандавугілля».

Проведені широкомасштабні випробування підтвердили принципову можливість оцінки небезпечності стану вугільних виробок з опору на спектральні характеристики сейсмоакустичних сигналів, джерелом яких є працюючі

механізмами. Результати, що були отримані, залишаються актуальними і безпосередньо впливають на усі дослідження та розробки сейсмоакустичних засобів поточного контролю стану виробок, а запропоноване відношення амплітуд «високочастотних» и «низькочастотних» складових сигналу стало загально прийнятим. Прогноз викидонебезпеки за такою процедурою з використанням апаратури АК-1 визначений стандартом галузі [1] як «прогноз за амплітудно-частотними характеристиками акустичного сигналу» (за АЧХ).

Разом з тим широкого використання у даному вигляді спосіб не набув. Причина в недовговічності елементів апаратури та складнощях з підбором фільтрів. Вочевидь, останній недолік обумовлений, перш за все, припущенням, що частота абсолютного екстремуму АЧХ лежить в наперед визначеному інтервалі, який обмежений найбільшою частотою фільтру низької частоти (300 Hz) та найменшою частотою фільтру високої частоти (600 Hz) [1]. Крім того, процедура визначення базового значення прогностичного показника в небезпечній зоні не є однозначною. Очевидно, що вказані недоліки, в значній мірі, обумовлені обмеженнями використання аналогової апаратури в неперервному режимі.

Наступний крок розвитку методу пов'язаний з використанням апаратури передачі сейсмоакустичного сигналу АПСС1 та обробкою сигналу на поверхні спеціально розробленою комп'ютерною програмою «PROGNOZ 4.0». Подання сигналу у цифровому вигляді значно розширило можливості аналізу сигналу та узагальнення сейсмоакустичних даних, що накопичуються. У галузевому стандарті прогноз викидонебезпеки, що передбачає використання АПСС1 і комп'ютерну обробку сигналу, названий як «прогноз за параметрами акустичного сигналу» (за ПАС).

Відповідно до стандарту використання обох розглянутих видів прогнозу можливо тільки з вказаною апаратурою, а в випадку прогнозу за ПАС і тільки з вказаним програмним забезпеченням. При цьому важливі деталі обробки сигналів і побудови прогностичних параметрів та вимоги до них не формулюються. Це призводить до монополізму виробника відповідної апаратури і програм, що у свою чергу гальмує вдосконалення методу.

**Основна частина.** На даний час фактично тільки другий метод прогнозу, тобто прогноз за ПАС, що просувався МакНДІ, впроваджений на більшості шахт України. Тому далі будемо розглядати особливості методології саме цього методу, що передбачає використання апаратури передачі сейсмоакустичного сигналу АПСС1 та програмного забезпечення «PROGNOZ 4.0». Будемо також використовувати позначення, які використовують автори і розробники названих продуктів.

Оцифрування аналогового сигналу виконується звуковою картою персонального комп'ютера. Аналоговий сигнал на виході наземного блоку (на вході звукової карти) обмежений зверху частотою близько 5000 Hz. Який саме крок дискретизації використовується в супроводжувальній документації та статтях не вказується, але зрозуміло що його частота не може бути нижче 10000 Hz (через елайзингове обмеження) і, вірогідно, не більше 20000 Hz.

Надалі, повинен бути визначений спектр. Які саме параметри при цьому використовуються і які вимоги ставляться також точно невідомо. Виходячи з параметрів, що можуть бути змінені в програмі, зрозуміло, що спектри обчислюються для окремих відрізків сигналу і надалі осереднюються; враховуються тільки відрізки, на яких рівень сигналу значуще (згідно [18–22] в 5 разів) перевищують рівень акустичного шуму, що спостерігався до початку роботи основного джерела (породоруйнівного механізму).

Алгоритм визначення прогностичних параметрів будується у припущенні, що спектр вже знайдений і амплітудна функція  $A(f)$  є гладкою неперервною функцією з трьома екстремумами (рис.1) [18, 19].

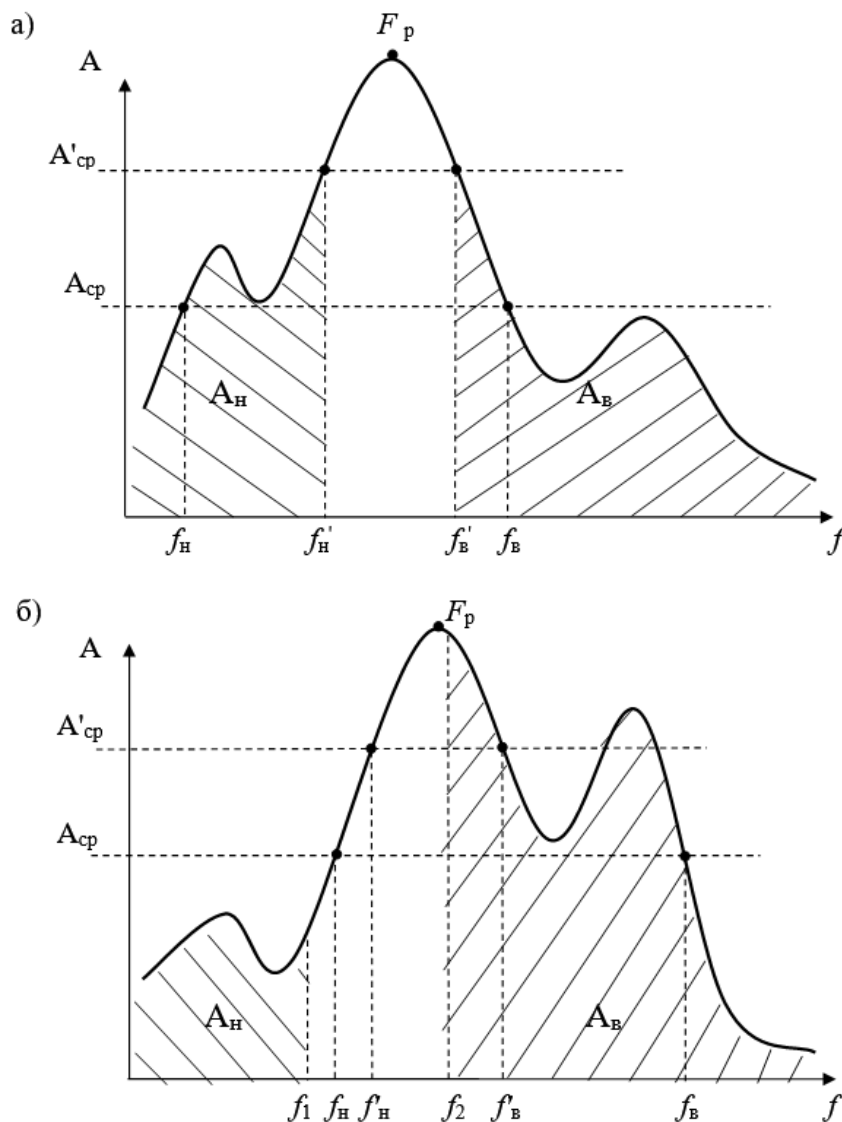


Рис. 1. Схематичний спектр акустичного сигналу в безпечній (а) і небезпечній (б) зонах і принцип визначення прогностичних параметрів: частота максимуму спектра ( $F_p$ ), нижні ( $f_H$  і  $f'_H$ ) і верхні ( $f_B$  і  $f'_B$ ) границі середнього значення амплітуд ( $A_{cp}$ ) і повторного осереднення ( $A'_{cp}$ ), низькочастотна ( $A_H$ ) і високочастотна ( $A_B$ ) складові, робочі частоти ( $f_1$  і  $f_2$ ) [18, 19]

Надалі послідовно визначаються [1, 20–22]:

1) Частота максимуму амплітуди  $F_p$ :

$$A(F_p) = \max_{f \in (0, f_{\max})} [A(f)];$$

2) Середній рівень амплітуд  $A_{cp}$ :

$$A_{cp} = \frac{\int_{f_{01}}^{f_{02}} A(f) df}{f_{02} - f_{01}}; \quad (1)$$

3) Нижня  $f_H$  і верхня  $f_B$  частоти при середньому рівні амплітуд  $A_{cp}$ :

$$A(f_H) = A(f_B) = A_{cp};$$

4) Середній рівень амплітуд (повторне осереднення) на проміжку  $[f_H, f_B]$   $A'_{cp}$ :

$$A'_{cp} = \frac{\int_{f_H}^{f_B} A(f) df}{f_B - f_H}; \quad (2)$$

5) Нижня  $f'_H$  і верхня  $f'_B$  частоти при середньому рівні амплітуд  $A'_{cp}$ :

$$A(f'_H) = A(f'_B) = A'_{cp};$$

б) «Амплітуди» високочастотної  $A_B$  і низькочастотної  $A_H$  складових:

$$A_B = \int_{f_B^P}^{f_2} A(f) df, \quad A_H = \int_{f_1}^{f_H^P} A(f) df; \quad (3)$$

7) Коефіцієнт викидонебезпеки  $K_B$ :

$$K_B = \frac{A_B}{A_H}$$

Значення  $f_{01}$  і  $f_{02}$ , якими треба задатися при виконанні першого осереднення (1), в документації і публікаціях не визначені.

Для обчислення високочастотної  $A_B$  і низькочастотної  $A_H$  складових (3) необхідно задати так звані «робочі частоти»  $f_1$  і  $f_2$ . Їх встановлюють за даними спостережень у небезпечних умовах, або за даними, що відібрані з даних поточних спостережень, але таких, що ідентифікуються як отримані в небезпечних умовах.

Згідно [1] робочі частоти «приймають відповідними значенням нижньої та верхньої межі частот при повторному осередненні амплітуд спектрів», тобто приймають  $f_1 = f'_H$ ,  $f_2 = f'_B$ .

Згідно [20, 21] «для обчислення низькочастотної і високочастотної складових встановлюються робочі частоти, які приймаються близькими значенням



нижньої і верхньої границь повторного осереднення амплітудного спектру», тобто близькими до  $f'_H$  і  $f'_B$ .

Наступне уточнення процедури визначення робочих частот дано в [22]. Фактично підбір робочих частот  $f_1$  і  $f_2$  може бути зведений до того «щоб добитися рівності значень  $A_B$  і  $A_H$ ». Частоти вибираються з «третьоктавного спектру», що мають дискретні значення, а саме для  $f_1$  і  $f_2$  «приймаються найближчі значення вище  $f'_H$  і нижче  $f'_B$ ».

Зауважимо, що така процедура визначення  $f_1$  і  $f_2$  фактично є цифровою реалізацією процедури визначення частот фільтрів при прогнозі за АЧХ (Міпер та ін., 1988).

У якості прогностичних параметрів при проведенні підготовчих виробок і веденні очисних робіт використовуються :

а) відповідно до [1]:

$$F_P, f_H, f_B, f'_H, f'_B, A_H, A_B, K_B$$

б) відповідно до [20, 21] пари параметрів:

$$A_H, A_B \text{ і/або } f_H, f'_H$$

Показник викидонебезпеки  $K_B$  не виділяється в наведених нормативних документах, але на практиці саме його значення використовується як найбільш інформативне [3, 23–25].

Наведений алгоритм 1)–7) використовується для

- встановлення початкових критичних значень, виходячи з значень прогностичних параметрів, знайдених в безпечних за викидами умовах;
- обчислення поточних значень прогностичних параметрів і співставлення їх з критичними значеннями з ціллю прогнозування стану виробки. При цьому  $A_H, A_B$  (3) обчислюються при попередньо встановлених «робочих частотах»  $f_1$  і  $f_2$ .

Наведений алгоритм, вочевидь, має суттєві недоліки.

- спектри реальних сигналів далеко не завжди мають 3 екстремуми;
- в силу використання ПК, спектр можна отримати використавши дискретне перетворення Фур'є і мати спектр тільки у вигляді послідовності відліків, а не у вигляді неперервної кривої; згладжування спектру, якщо воно попередньо проводиться, суттєво залежить від параметрів цієї процедури [26];
- значення  $f_{01}$  і  $f_{02}$  в (1) невизначені, і не зовсім зрозуміло на яких підставах їх треба обирати. Якщо врахувати, що зазвичай збудження лежать в інтервалі до 1500 Hz, то можливо можна прийняти  $f_{01} = 0$ . Аналогічне призначення для  $f_{02}$  частоти Нативіста буде приводити до суттєвого зменшення значення  $A_{cp}$ ;
- незначні зміни спектральної залежності можуть приводити до суттєвих змін прогностичних параметрів.

Справедливість останнього твердження продемонструємо на прикладах.

Амплітудний спектр моделювався решітчастою нормованою по максимальному значенню функцією,  $A(i\Delta f)$ ,  $i = 0, 1 \dots 100$ , заданою на проміжку  $[0, 1000] Hz$  з кроком  $\Delta f = 10 Hz$  (кожна точка на графіку – відлік).

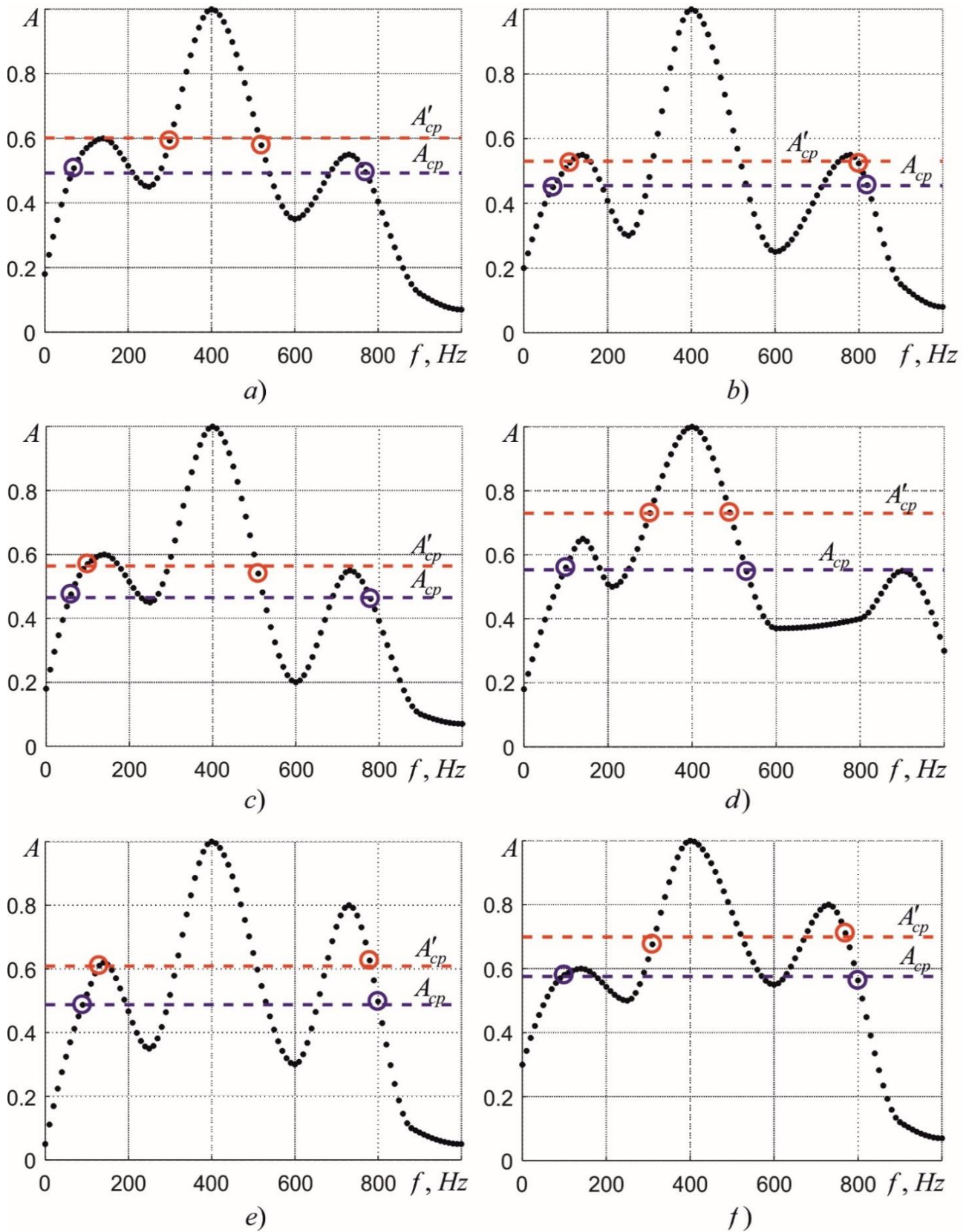


Рис. 2. Варіанти спектрів v1 – v6 і обчислення на їх підставі прогностичних параметрів: а) – v1; б) – v2; с) – v3; д) – v4; е) – v5; ф) – v6

Залежності спектрів від частоти бралися у вигляді близькому до прийнятих у [18, 19] з трьома екстремумами. Обчислення велися за наведеною вище процедурою 1) – 7). Приймалося  $f_{01} = 0 \text{ Hz}$  і  $f_{02} = 1000 \text{ Hz}$ . Частоти  $f_H, f_B, f'_H, f'_B$ , визначення яких відбувалося по осередненим значенням амплітуди, знаходилися як абсиси найближчих дискретних точок до точок перетину умовної неперервної амплітудної кривої з прямими  $A = A_{cp}$  і  $A = A'_{cp}$ .

Спектральні криві представлені на рис.2. Отримані числові значення параметрів наведені у таблиці, а графічне порівняння прогностичних частот  $f_H, f_B, f'_H, f'_B$  дає рис. 3а. На рис.2 також показані лінії, що відображають процеси обчислення прогностичних параметрів. Синій колір пов'язаний з першим осередненням, червоний – з повторним (табл.).

Таблиця

Числові значення прогностичних параметрів для різних варіантів спектрів

Варіант спектру	$f_H$	$f'_H$	$f_B$	$f'_B$	$A_H$	$A_B$	$K_B$	$K_B^{(1)}$	$K_B^{(2)}$
v1	70	300	770	520	148	160	1,09	1,09	0.695
v2	70	110	820	800	43,4	43,1	0,994	1,23	0,994
v3	60	100	780	510	41,6	143	3,43	0,929	0.635
v4	100	300	530	490	156	226	1,45	1,32	2,11
v5	90	130	800	780	48,1	40,1	0,834	1,40	0,792
v6	100	310	800	770	165	58,3	0.353	1,42	0,739

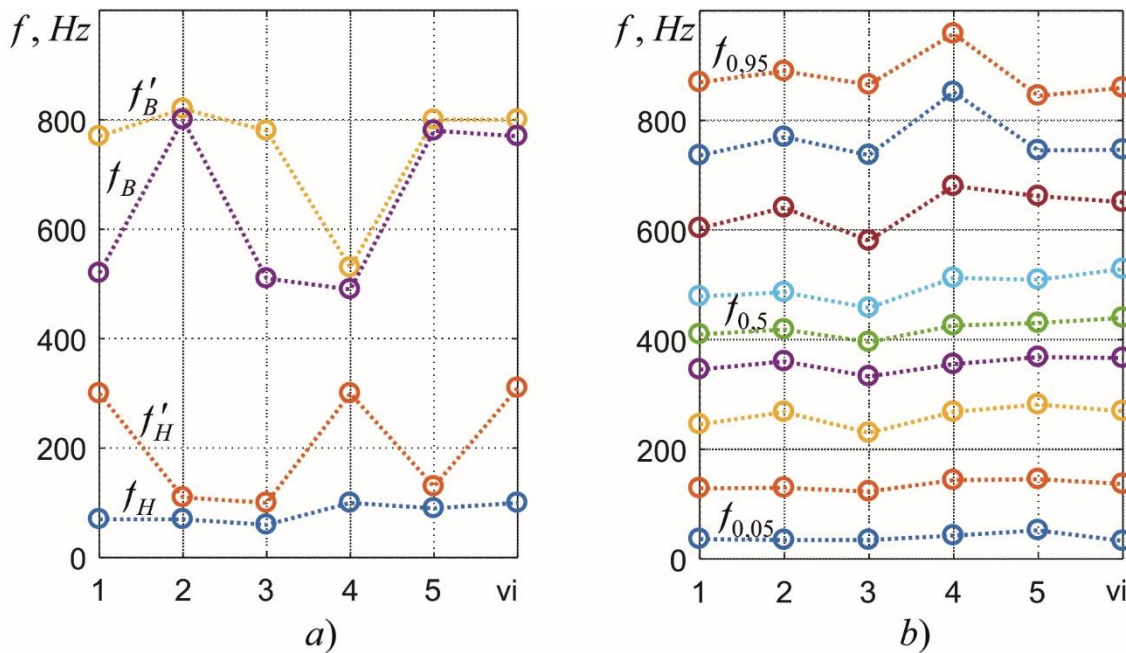


Рис. 3. Прогностичні частоти  $f_H, f_B, f'_H, f'_B$  (а) і квантілі  $f_{0.05}, f_{0.125}, f_{0.25}, f_{0.375}, f_{0.5}, f_{0.625}, f_{0.75}, f_{0.875}, f_{0.95}$  (б) для спектрів варіантів v1–v6

Особливу увагу потребують точки, що помічені на кривих червоним (їх абсциси  $f'_H$  і  $f'_B$ ), так як саме вони обумовлюють значення робочих частот, а значить і  $A_H$ ,  $A_B$  і  $K_B$ .

Слід звернути увагу, що спектральні залежності варіантів v1, v2 і v3 майже однакові, і в той же час  $f'_H$  і  $f'_B$  та  $K_B$  суттєво різні. Навпаки, у варіанті v4 третій екстремум на спектральній кривій перемістився у область значно більш високих частот, але  $f'_H$  і  $f'_B$  фактично залишилися таким ж як і у варіанті v1. Очевидна різниця між спектрами варіантів v2 і v5, але значення  $f_H$ ,  $f_B$ ,  $f'_H$ ,  $f'_B$  майже однакові.

Отримання помітно різних значень  $f'_H$  і  $f'_B$  по спектрам, що відрізняються незначно, заслуговує особливої уваги. Проблема в тому, що отримані в небезпечних умовах значення  $f'_H$  і  $f'_B$  надалі, при поточних спостереженнях, використовуються як робочі  $f_1$  і  $f_2$  і безпосередньо визначають прогностичні параметри  $A_H$ ,  $A_B$  і  $K_B$ .

Припустим, що в силу випадкової мінливості в одних й тих же безпечних умовах може бути отриманий або спектр варіанту v1, або близький до нього спектр варіанту v2. В обох випадках значення  $f'_H$  і  $f'_B$  можуть бути взяті у якості робочих частот, так як відповідні їм  $K_B$  близькі до 1 (для v1 –  $K_B = 1.09$ , а для v2 –  $K_B = 0.99$ ). Якщо виходити з варіанту v1, то слід прийняти для робочих частот  $f_1 = 300 \text{ Hz}$ ,  $f_2 = 520 \text{ Hz}$ . Тоді для поточних спектрів у вигляді варіантів v2 – v6 прогностичні коефіцієнти викидонебезпеки  $K_B$  будуть мати значення, що в таблиці 1 позначені  $K_B^{(1)}$ . Якщо ж виходити з варіанту v2, то  $f_1 = 110 \text{ Hz}$  і  $f_2 = 800 \text{ Hz}$  і для поточних спектрів у вигляді варіантів v1, v3 – v6 значення коефіцієнтів викидонебезпеки будуть помітно іншими, їх значення в таблиці позначені  $K_B^{(2)}$ .

Можна звернути увагу на значення  $K_B^{(2)}$  для варіантів спектрів v5 і v6. Візуально названі спектри мають очевидне збільшення «високочастотних» складових, однак значення  $K_B^{(2)} < 1$  свідчить про протилежне. Очевидно, що це протиріччя обумовлено занадто великим проміжком між робочими частотами  $f_1$  і  $f_2$ , що отримані на підставі «безпечного» варіанту спектру v2.

З наведених даних випливає, що розглянутий підхід до вибору прогностичних параметрів та методика їх обчислення, принаймні в окремих випадках, не спроможні відобразити перерозподіл спектру і може приводити до суперечливих значень шуканих параметрів.

Очевидно, що відмічені недоліки можуть бути усунуті шляхом ускладнення алгоритму обчислення прогностичних параметрів. Втім, прийнявши, що проблема в значній мірі обумовлена безпосереднім використанням спектру у вигляді схематизованої функції з декількома максимумами, природньо попередньо перейти до іншої, бажано монотонної, функції. В якості такої функції може бути використана кумулятивна функція спектру, який розглядається як розподіл. Звичайно, більш обґрунтовано виходити з спектральної щільності потужності. У якості числових величин, на яких надалі можуть будуватися прогностичні параметри, доцільно використовувати квантилі кумулятивної функції потужності.

Квантилі більш робастні і стійкі по відношенню до параметрів спектрального оцінювання шумоподібних сигналів [27].

Для порівняння проведено розрахунок квантилів  $f_{0.05}, f_{0.125}, f_{0.25}, f_{0.375}, f_{0.5}, f_{0.625}, f_{0.75}, f_{0.875}, f_{0.95}$  для тих же самих варіантів спектральних залежностей  $v1 - v6$ , що зображені на рис. 2. Результати наведені на рис. 3b і мають вигляд більш співставний з видом спектрів. А саме: квантилі для практично однакових спектрів  $v1, v1, v3$  також практично однакові; квантилі  $v4$  зсунулися в бік високих частот у відповідності з розташуванням третього екстремуму спектру; квантилі  $v5$  ущільнилися в тій частотній області де у спектрі спостерігається зростання третього екстремуму.

Практичне використання може полягати у відслідковуванні зміщень квантилів поточного стану  $f_{\xi}$  відносно квантилів отриманих в небезпечних умовах  $f_{\xi}^0$ :

$$\Delta f(\xi) = f_{\xi} - f_{\xi}^0,$$

де:  $\xi$  – рівень квантиля.

На рис. 4a наведені графіки  $\Delta f(\xi)$  для розглянутих варіантів, де у якості базових квантилів  $f_{\xi}^0$  взяті квантилі варіанту  $v2$ . Додатні значення  $\Delta f(\xi)$  свідчать про відносне зміщення спектральних розподілів в бік більш високих частот.

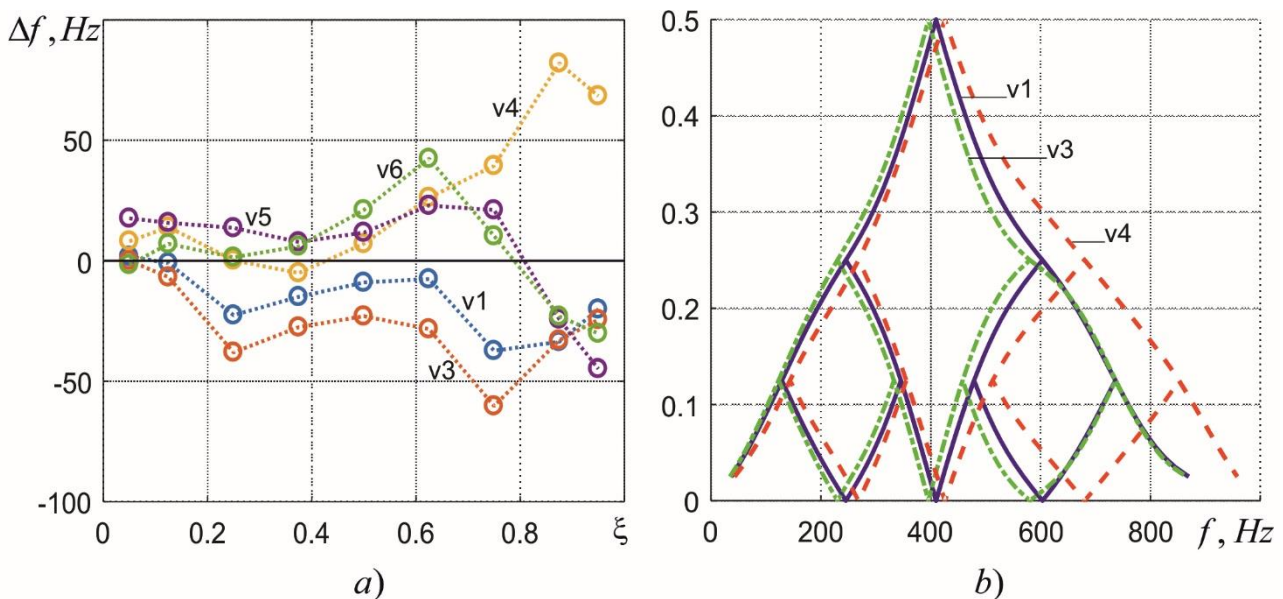


Рис. 4. Зміщення квантилів спектрів варіантів  $v1, v3-v6$  відносно квантилів спектру варіанту  $v2$  (a); квантильні трикутники для спектрів варіантів  $v1, v3, v4$  (b)

Взагалі квантилі більш інформативні що до переміщення та перерозподілу спектру. Цю властивість треба вважати найбільш важливою при сейсмоакустичному спостереженні з метою прогнозування небезпечних станів. Можна відмітити, що і розробники системи АПСС1-«PROGNOZ 4.0», досвід яких не викликає сумніву, мають схожу думку, коли пояснюють необхідність використання чотирьох прогностичних параметрів: «Реальні спектри акустичного сигналу мають, як правило, складний обрис, що відображає складну будову товщі

вуглевмісних порід. Тому для надійної фіксації зміщення спектра визначено чотири прогностичні параметри» [18, 19].

Для візуалізації запропонованого оцінювання спектру з опором на квантилі можна використати кумулятивні трикутники [28]. Такі геометричні об'єкти для трьох варіантів спектрів представлені на рис.4б.

Слід врахувати, що при використанні запропонованого квантильного підходу зменшується можливість виявлення у сигналах гармонійних складових. Якщо є потреба в ідентифікації таких складових, то необхідно, перш за все, відповідно скорегувати методологію побудови спектру, відділивши задачу оцінювання параметрів гармонійних складових від спектрального оцінювання (Marple, 1987). В даному дослідженні, з огляду на прийнятий вид залежностей (див. рис. 1, 2), даними для обчислення прогностичних параметрів є результати спектрального оцінювання, що додає підстав для використання квантилів.

**Висновки.** Розглянуті особливості обчислення прогностичних параметрів газодинамічних явищ, що спираються на спектральні залежності сейсмоакустичних сигналів генерованих впливом породоруйнівних машин на забій. Показана спорідненість прогнозу за аналоговими методами і процедурами отримання чисельних значень прогностичних параметрів.

Детально розглянута процедура обчислення прогностичних параметрів з використанням апаратури передачі сейсмоакустичного сигналу АПСС1 та програми «PROGNOZ 4.0», що використовуються на більшості викидонебезпечних шахт України. Процедура застосовувалася до змодельованих чисельних спектрів, вигляд яких відповідав прийнятій схематизації спектру кривою з трьома максимумами. Приймалося, що прогнозування небезпечного стану базується на відслідковуванні перерозподілу спектральних складових у реєстрованих сигналах, а якість процедури оцінювалася як здатність змін значень параметрів адекватно відобразити такий перерозподіл. Показано, що розглянута процедура, принаймні в окремих випадках, не спроможна відобразити перерозподіл спектру і може приводити до суперечливих значень шуканих параметрів.

Запропоновано використовувати для формування прогностичних параметрів квантилі кумулятивної функції спектру. Квантилі більш робастні і стійкі по відношенню до параметрів спектрального оцінювання шумоподібних сигналів. Проведені розрахунки квантилів для тих же самих змодельованих чисельних спектрів. Зміни квантилей адекватно відображають зміни форми та зміщення спектрів, тобто містять інформацію, що є основою при прогнозуванні ГДЯ в шахті за сейсмоакустичними сигналами.

#### Перелік посилань

1. СОУ 10.1.00174088.011–2005 *Правила ведення гірничих робіт на пластах схильних до газо–динамічних явищ.* (2005). Мінвуглепром України.
2. Луньов, С. Г., Колчин, Г. І., & Нікіфоров, А. В. (2002). Динаміка масиву в небезпечних по газодинамічним явищам зонах. *Геотехнічна механіка*, (40), 132–137.
3. Нікіфоров, А. В., & Рижков, М. Ф. (2018). Дослідження динаміки зміни параметрів акустичного сигналу перед викидами вугілля та газу. *Способи та засоби створення безпечних та здорових умов праці у вугільних шахтах*, 1(40), 5–14.

4. Kabiesz, J., Sikora, B., Sikora, M., & Wróbel, L. (2013) Application of Rule-Based Models for Seismic Hazard Prediction in Coal Mines. *Acta Montanistica Slovaca*, 18(4), 262–277. <https://actamont.tuke.sk/pdf/2013/n4/7sikora.pdf>
5. Peng, J., & Shi, S. (2023). Hazard prediction of coal and gas outburst based on the Hamming distance artificial intelligence algorithm (HDAIA). *Journal of Safety Science and Resilience*, 4(2), 151–158. <https://doi.org/10.1016/j.jnlssr.2022.12.001>
6. Jinqiang, W., Basnet, P., & Mahtab, S. (2021). Review of machine learning and deep learning application in mine microseismic event classification. *Mining of Mineral Deposits*, 15(1), 19–26. [http://mining.in.ua/2021vol15\\_1\\_3.html](http://mining.in.ua/2021vol15_1_3.html)
7. Anani, A., Adewuyi, S. O., Riso, N., & Nyaaba, W. (2024). Advancements in machine learning techniques for coal and gas outburst prediction in underground mines. *International Journal of Coal Geology*, 285(11), 104471. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2024.104471>
8. Du, J., Chen, J., Pu, Y., Jiang, D., Chen, L., & Zhang, Y. (2021). Risk assessment of dynamic disasters in deep coal mines based on multi-source multi-parameter indexes and engineering application. *Process Safety and Environmental Protection*, 155, 575–586. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.12.025>
9. Sun, H., Qi, Y., Tian, W., Chen, G., & Wang, Y. (2021). Propagation Features of Channel Wave Signal in Coal Seam with Scouring Zone. *Traitement du Signal*, 38(4), 1149–1160. <https://doi.org/10.18280/ts.380426>
10. Schwardt, M., Pilger, C., Gaebler, P., Hupe, P., & Ceranna, L. (2022). Natural and anthropogenic sources of seismic hydroacoustic and infrasonic waves: Waveforms and spectral characteristics (and their applicability for sensor calibration). *Surveys in Geophysics*, 43(5), 1265–1361. <https://doi.org/10.1007/s10712-022-09713-4>
11. Chambers, D., & Shragge, J. (2023). Seismoacoustic Monitoring of a Longwall Face Using Distributed Acoustic Sensing. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 113(4), 1652–1663. <https://doi.org/10.1785/0120220219>
12. Hu, H., Dou, L., Gong, S., He, J., Zheng, Y., & Zhang, X. (2019). Microseismic and electromagnetic coupling method for coal bump risk assessment based on dynamic static energy principles. *Safety Science*, 114, 30–39. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.12.025>
13. Cao, A., Dou, L., Cai, W., Gong, S., Liu, S., & Jing, G. (2015). Case study of seismic hazard assessment in underground coal mining using passive tomography. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 78, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.05.001>
14. Chen, Y., Zhang, J., Zhang, J., Xu, B., Zhang, L., & Li, W. (2021). Rockburst Precursors and the Dynamic Failure Mechanism of the Deep Tunnel: A Review. *Energies*, 14, 7548. <https://doi.org/10.3390/en14227548>
15. Meyer, S. (2024). Seismic Monitoring Systems in Mines, where are we Today? *58th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*. <https://doi.org/10.56952/arma-2024-0785>
16. Brijraj, S., Moolla, S., & Lynch, R. (2024). Full-waveform automatic location of small seismic events in an underground mine using synthetic strain Greens tensors. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 124, 269–278. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/1416/2024>
17. Liu, F., Wang, Y., Kou, M., & Liang, C. (2024). Applications of Microseismic Monitoring Technique in Coal Mines: A State-of-the-Art Review. *Applied Sciences*, 14(4), 1509. <https://doi.org/10.3390/app14041509>
18. Луньов, С.Г., & Колчин, Г.І. (2005). Акустичний контроль викидонебезпеки в очисному вибої. *Способи та засоби створення безпечних та здорових умов праці у вугільних шахтах*, 1(17), 97–109.
19. Коптіков, В.П., Бокій, Б.В., Мінеєв, С.П., Южанін, І.А., & Нікіфоров, А.В. (2016). Удосконалення способів та засобів безпечної розробки вугільних пластів, схильних до газодинамічних явищ. Донецьк: «Промінь».
20. *Посібник із застосування на шахтах Донбасу способу контролю викидонебезпечності привибійної частини масиву в підготовчих виробках за параметрами акустичного сигналу.* (1996). Мінвуглепром України.

21. Посібник із застосування на шахтах Донбасу способу автоматизованого контролю викидонебезпеки в очисних виробках за параметрами техногенного акустичного сигналу. (2000). Державний департамент вугільної промисловості Мінпаливенерго України.
22. Посібник із застосування програмного забезпечення PROGNOZ 4.0. (2013). МакНДІ.
23. Shadrin, A. V., & Kontrimas, A. A. (2017). Basic tasks for improving spectral-acoustic forecasting of dynamic phenomena in coal mines. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 84, 012040. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/84/012040>
24. Луньов, С. Г. (2000). Особливості прогнозу викидонебезпеки в очисних вибоях. *Способи та засоби створення безпечних та здорових умов праці у вугільних шахтах*, 1(7), 133–138.
25. Коваль, А. Р., Колчин, Г. І., Бондаренко, А. Д., Алексієв, Е. В., & Лукашев, А. А. (2011). Акустичні дослідження на особливо небезпечному пласті в умовах шахти ім. А. А. Скочинського. *Способи та засоби створення безпечних та здорових умов праці у вугільних шахтах*, 2(28), 100–106.
26. Lars, J. K., Leitao, A., & Nguyen, D. (2023). Spline local basis methods for nonparametric density estimation. *Statist. Surv*, 17, 75–118. <https://doi.org/10.1214/23-SS142>
27. Golovko, Y. M. (2023). Spectral estimation of a broadband time-limited noise signal. *Математичне моделювання*, 2(49), 86–97. [https://doi.org/10.31319/2519-8106.2\(49\)2023.292638](https://doi.org/10.31319/2519-8106.2(49)2023.292638)
28. Golovko, Y., & Sdvyzhkova, O. (2024). Cumulative triangle for visual analysis of empirical data. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 4, 114–120. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-4/114>

#### ABSTRACT

**Purpose.** Study of possible shortcomings of the procedure for calculating the normatively accepted prognostic parameters of the current forecast of gas-dynamic phenomena in mines based on spectral characteristics of seismoacoustic signals caused by the action of rock-destroying mechanisms on a coalface.

**The methods.** The studies that served as a basis for establishing the existing procedure for calculating prognostic parameters were analyzed. Computer modeling of spectral curves and calculations based on the spectra of prognostic parameters was performed. An assessment of the correspondence between the values of parameters and the type of spectral curves was made.

**Findings.** The relationship between forecasting methods using analog equipment and procedures for obtaining numerical values of forecast parameters is demonstrated. The standard procedure for calculating forecast parameters, implemented in most outburst-hazardous mines in Ukraine, is examined in detail. It is found that this procedure, at least in some cases, cannot reflect the redistribution of the spectrum and can lead to contradictory values of the sought parameters. The possibility of using quantiles of the cumulative function of the spectrum to form forecast parameters was investigated. It is shown that quantile changes adequately reflect shape changes and spectra shifts.

**The originality.** The presence of unstable spectra of seismoacoustic signals relative to the values of the accepted prognostic parameters has been proven. It has been established that the prognostic parameters calculated by the accepted procedure may not reflect real changes in the signal spectrum and, accordingly, be erroneous. It is proposed to build a forecast of a dangerous state based on the spectrum quantiles of seismoacoustic signals.

**Practical implementation.** The study results can be used to correct the algorithm for calculating prognostic parameters according to the accepted procedure and to improve the forecast methodology by using spectra quantile estimates.

**Keywords:** forecast of gas-dynamic phenomena, spectral estimation, outburst-hazardous coefficient, quantiles.