

## Фрактально-хвильова природа геологічного середовища кам'яновугільних відкладів Донбасу

*К.А. Безручко, Л.І. Пимоненко, А.А. Каргаполов, В.Г. Барановський, 2022*

Інститут геотехнічної механіки ім. Н.С. Полякова НАН України, Дніпро, Україна  
Надійшла 22 квітня 2021 р.

Проведено дослідження структури розривних і складчастих порушень осадових відкладів Донбасу на різних масштабних рівнях: від мікродислокацій до крупно-амплітудних дислокацій. На всіх масштабних рівнях визначено латеральна повторюваність складок, зумовлена хвильовими процесами, викликаними імпульсними горизонтальними тектонічними силами в постінверсійний період. За параметрами природних і техногенних розривних дислокацій Донбасу розрахована фрактальна розмірність для залежностей довжин, кількості порушень, площі поверхні зміщувачів, відстані між тріщинами від масштабу карт для окремих шахт і виробок, вугільних пластів і пісковиків. Виміри проводили по мікрофотографіях вугільних частинок, у гірничих виробках, по геологічних картах Донбасу та окремих районів. Установлено, що розподіли розривних порушень у вуглепородному масиві описуються логнормальними та степеневими законами. Це засвідчує фрактальність розривної порушеності осадових відкладів Донбасу, а відмінності фрактальної розмірності на різних масштабних рівнях вказують на її мультифрактальність. Достовірність отриманих результатів підтверджується подібністю фрактальної розмірності, розрахованої різними методами. Розбіжність значень фрактальної розмірності на різних масштабних рівнях відображає наявність додаткових локальних або регіональних чинників, що впливають на формування структури басейну. Отримані дані засвідчують дію фрактально-хвильових процесів, які, накладаючись на відклади, що утворилися, сформували складну структуру осадової товщі Донбасу.

**Ключові слова:** геологічне середовище, осадові відклади, вуглепородний масив, хвильові процеси, фрактальна розмірність.

Сучасні геологічні процеси і гірничі роботи накладаються на геологічне середовище, що склалося протягом мільйонів років, яке формувалося під впливом інтегрального геодинамічного поля, що представляє сумарний вплив гравітаційного, магнітного, електричного, механічного, хімічного, температурного та інших полів. На даний час є дві основні моделі геологічного середовища. Перша модель представляє структуру масиву у вигляді блоків, окремостей зі співвідношенням лінійних розмірів різномасштабних блоків 0,5 [Плотников, Петров, 1969; Тяпкін, Ківелюк, 1982; Богаченко, 1971; Забігайло та ін., 1994]. Згідно з другою, геологічне середовище є дискретною масштабно-ієрархічною системою з нелінійним співвідношенням роз-

мірів [Садовський та ін, 1987; Булат, Дирда, 2005; Лукінов, Пимоненко, 2008; Шуман та ін., 2012; Міланюк, 2018]. Для інтерпретації геолого-геофізичних даних у першій моделі застосовуються закони механіки суцільних середовищ, відповідно до яких латеральна повторюваність тектонічних структур пов'язана з хвильовими процесами, що виникають під час дії різних силових полів. Друга модель базується на властивій геологічному середовищу ієрархічній дискретній самоподібній структурі. Математичним виразом самоподібності такої системи є статистичні закони з фрактальною розмірністю різномасштабних блоків  $1 < D_0 < 2$ . Вочевидь, кожна модель характеризує різні властивості геологічного середовища і, отже, передбачає різну

методологію оцінки та прогнозу гірничо-геологічних умов, які необхідно враховувати під час пошуків, розвідки і розробки родовищ. Тому вивчення формування та еволюції геологічного середовища — актуальне завдання на сучасному етапі.

Натепер роль хвильових процесів розглянута в низці монографій [Плотніков, Петров, 1969; Богаченко, 1971; Тяпкін, Ківелюк, 1982; Забігайло та ін., 1994], в яких показано їх вплив на утворення розривних та складчастих порушень, металогенічну спеціалізацію рудних родовищ, виникнення землетрусів, закономірності перерозподілу речовини земної кори та багатьох інших геологічних явищ.

Вперше в роботі [Плотніков, Петров, 1969] було висловлено припущення про те, що просторова періодичність розподілу деформацій, що спостерігається як у геологічних тілах, так і в експериментах, обумовлена інтерференцією хвиль напруг, що викликаються деформуючим навантаженням і відбиваються від «упору» з утворенням системи стоячих хвиль напруги.

На думку С.І. Шермана, деформаційні хвилі генеруються головним чином зсувами великих блоків літосфери, які, у свою чергу, викликані підлітосферними рухами мас в астеносферному шарі [Sherman, 2013]. Деформаційні хвилі порушують метастабільний стан розломно-блокового середовища літосфери, стимулюють міжблокові зміщення, що в результаті призводить до активізації різнорангових розломів.

Розвиваючи ідеї К.Ф. Тяпкіна, А.В. Вікулін розглядає хвильову природу сейсмічного процесу як результат активізації міжблокових розломів, яка викликана обертанням Землі [Вікулін, 2003]. В основі ротаційної моделі лежать уявлення про «елементарні» сейсмофокальні блоки, що повертаються в умовах планети, Яка обертається. Параметри та поняття про ротаційні хвилі, що вводяться автором, як одне з багатьох інших джерел, що впливають на сейсмічний процес хвильових процесів у літосфері, не є загальновизнаними, але становлять певний інтерес.

У роботі В. Подрушина на прикладі За-

хідного та Центрального Сибіру показано, що енергія тектонічних процесів поширюється у формі довгоперіодних хвиль, параметри яких змінюються у просторі та часі [Подрушин, 2014].

Ініціювання деформаційних процесів у земній корі слабкими збуреннями детально обговорюються у статтях [Кочарян, Федоров, 1990; Кочарян та ін., 2004 та ін.]. В них розглядається можливість деформації блокового середовища за рахунок накопичення результатів впливів «нікчемних» за величиною силових полів. Вони реалізуються завдяки нелінійності деформаційних характеристик міжблокових розломних зон у областях малих деформацій. Показано, що однозначність співвідношень «напруга-переміщення», відоме для континуальних середовищ, у блочному середовищі не завжди виконується. Інтегровані слабкі, і короточасні динамічні впливи на метастабільне блокове середовище здатні ініціювати повільний деформаційний процес, внесок якого у сумарну величину накопичених деформацій може бути дуже значним. Викладене пояснює можливість коливальних та хвильових процесів приводити до зсувів блоків і, отже, до активізацій міжблокових розривів.

У роботі [Кузьмін, 2012] прямими геодезичними вимірами встановлені «міжрозломні» та «внутрішньорозломні» хвилі. На думку автора, більшість емпірично виявлених характеристик просторово-часової міграції сучасних деформацій у розломних зонах є результатом параметричного порушення внутрішньорозломного середовища малими впливами, що узгоджується з сучасними уявленнями про автохвильові процеси.

У роботі [Баранікова та ін., 2012] проведено результати, зареєстровані методом лазерної двоекспозиційної спекл-фотографії, просторово-часового розподілу локальних компонентів тензора дісторсії при активній деформації стисненням квазіпластичних матеріалів — гірських порід. Встановлено автохвильовий характер розвитку локалізованої пластичної деформації при стисканні зразків із гірських

порід (сильвініту, мармуру та пісковіку) та лужно-галоїдних кристалів (NaCl, KCl, LiF), що деформуються за рахунок різних мікромеханізмів. Отримані результати, по-перше, показали подібність картин локалізації в моно- і полікристалах металів і сплавів, по-друге, дозволили визначити швидкість розповсюдження автохвиль, що виникають у зразках при стисканні, що становить  $\sim 10^{-5} \dots 10^{-4}$  м/с і близька до швидкості повільних хвиль, що спостерігалися в земній корі після землетрусів або гірських ударів.

Найбільш наочним відображенням просторових хвильових процесів є латеральна повторюваність тектонічних структур: розриви, складки, зони розтягування та стиснення. У проведених раніше дослідженнях багаторазово відзначалося закономірне просторове розміщення розривних та складчастих порушень у геологічних середовищах на різних масштабних рівнях та уявлення авторів про рушійні сили, що викликають хвильові процеси. Це відомі роботи К.Ф. Тяпкіна (див., наприклад, [Тяпкін, Ківелюк, 1982]), у яких зазначено закономірне розташування зон глибинних розломів у породах фундаменту щитів (Українського, Канадського, Анабарського), викликане, на думку авторів, ротаційними процесами.

У роботі [Плотніков, Петров, 1969] на підставі аналізу зміни потужностей осадових відкладень Скіфсько-Туранської плити встановлено періодичність розташування позитивних та негативних складчастих структур, відзначено їх хвилеподібний характер, розраховано довжини та амплітуди хвиль, джерела збудження, показана мінливість інтенсивності процесів у часі.

Аналогічні дослідження закономірного розташування порушень проведені на різних масштабних рівнях у межах Донецького басейну. Візуально на Тектонічній схемі української частини Великого Донбасу (гл. ред. В.С. Попов, 1968 р.) на сході регіону простежується латеральна повторюваність великоамплітудних складок поздовжнього вигину, а в центральній частині флексурні складки. Хвильовий характер розривних і

складчастих малоамплітудних порушень у Центральному та Донецько-Макиївському районах Донбасу відзначений у роботах [Богаченко, 1971; Забігайло та ін., 1994].

Таким чином, у багатьох публікаціях встановлена закономірна системна порушеність фундаменту і осадового чохла Донбасу різного порядку, що підтверджує хвильову природу полів напруг, що зумовили їх утворення.

Проте за більш ретельному вивченні багатьма авторами відзначається невідповідність моделей закономірного рівномірного розподілу порушень у земній корі реальним об'єктам. І насамперед це пов'язано з тим, що в більшості моделей застосовуються закони механіки суцільних середовищ, у той час як геологічне середовище дискретне і має внутрішню ієрархію і певну структурну організацію.

Під час дослідження багатьох вугільних басейнів фрактальний аналіз геологічних об'єктів знайшов широкого застосування. Одним із основоположників цього напрямку є М.А. Садовський. За його уявленнями геологічне середовище може бути представлена у вигляді ієрархічної системи подібних блоків або структур, вкладених одні в інші, розміри яких підпорядковуються геометричній прогресії [Садовський та ін., 1987]. Утворення такої структури масиву викликано тим, що в земній корі постійно існують інерційно-вібраційні хвилі двох типів: біжучі (енерго-активаційні) і стоячі (вібраційно-хвильові). Саме стоячі хвилі призводять до утворення накопичень порушень у зонах пучності. Тому і фізичні поля, зумовлені такими системами, також утворюють ієрархічні послідовності аномалій, що відповідають різним рівням ієрархії.

У роботі [Шуман та ін., 2012] геологічне середовище розглядається як відкрита нерівноважна динамічна система з безліччю структур, що самоорганізуються, наочним виразом якої є ієрархічна впорядкована система блоків. Автори наголошують, що саме такі фрактальні структури здатні генерувати різноманітні типи сейсмічних та електромагнітних збурень — від простих одиночних до хаотичних.

У Донбасі дослідження фрактальності структур проводилися різними методами і на різних масштабних рівнях [Булат, Дирда, 2005].

На підставі аналізу проведених раніше досліджень поставлено мету — визначити роль фрактальних та хвильових процесів у формуванні геологічного середовища осадових відкладень Донбасу на різних масштабних рівнях.

*Об'єкт досліджень* — фрактальні та хвильові процеси, що відбуваються в геологічному середовищі, на прикладі осадових відкладень Донбасу.

*Предмет досліджень* — структура розривних та складчастих порушень осадових відкладень Донбасу (від мікродислокацій до великоамплітудних порушень).

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі завдання:

- дослідження латеральної мінливості складчастих порушень Донбасу;
- дослідження фрактальності порушень в межах вуглепородного масиву за даними, отриманими сейсмологічним методом;
- дослідження фрактальності на макrorівні за параметрами розривних дислокацій (від глибинних розломів до мікротріщин);
- дослідження на мікrorівні мікротріщинуватості та тріщинуватості вугільних пластів;
- розробка феноменологічної самоподібної масштабної-ієрархічної моделі вуглепородного масиву.

**Методи досліджень.** Донецький басейн у тектонічному плані є лінзою осадових порід, розташованою між кристалічними масивами і залягає на консолідованому фундаменті. Гранітні масиви та фундамент розбиті розломами на окремі блоки. Масив осадових відкладень містить структури руйнування різного масштабу: від мікротріщин до блоків, межами яких є середньота великоамплітудні розриви, тобто наявні дані дозволяють провести дослідження на різних масштабних рівнях.

Основними параметрами, які кількісно характеризують розривні порушення (від макро- до малоамплітудних), є амплітуда

( $A$ ), протяжність ( $l$ ), ширина ( $H$ ) та кількість ( $n$ ) дислокацій, між якими існують тісні взаємозв'язки [Лукінов, Пимоненко, 2008], що дозволяє застосовувати кожен із них. Однак, враховуючи те, що амплітуда та ширина порушень на мікrorівні не визначаються, як однотипний показник на різних масштабних рівнях, був використаний показник щільності розривних порушень ( $K_p$ ), рівний відношенню суми довжин порушень до площі квадрата (але при цьому розміри сторін квадратів залежать від масштабів досліджень). Оцінку фрактальної розмірності розривних дислокацій у межах Донецького басейну проведено методом Хаусдорфа-Безиковича [Федер, 1991] за параметрами, вимірними на тектонічних картах різного масштабу та планах гірничих робіт.

В межах вуглепородного масиву шахти ім. О.Ф. Засядька проведено узагальнення результатів сейсмологічних спостережень, отриманих за допомогою багатоканальної сейсмоакустичної системи [Pimonenko et al., 2019]. Для оцінки інтенсивності та кількості сейсмічних явищ, генетично пов'язаних з тріщиноутворенням, застосовувалися показники: клітинної розмірності Хаусдорфа-Безиковича ( $D_0$ ), Херста ( $H$ ) та закону Гутенберга—Ріхтера.

На мікrorівні дослідження проводилися петрографічним методом на відеооптичному комплексі (мікроскоп МБІ-11, відеокамера НВ 200, ПК) з проб вугілля, відібраного з пластів середнього карбону. Розрахунок фрактальної розмірності мікроструктури вугільного речовини базувався на чисельних характеристиках дисперсного складу та форми мікрочастинок у діапазоні від 0 до 1000 мкм. В даний час для вивчення дисперсного складу проб найбільш часто застосовуються наступні показники: кількість частинок ( $N$ ), площа ( $S$ ), периметр ( $L$ ), діаметр Ферету ( $dF$  — відстань між двома дотичними на протилежних сторонах частинки, перпендикулярними до напрямку, в якому розглядається частинка). Інформативність показників для характеристики дисперсного складу вугільних проб визначалася методом цифрової обробки мікро-



фотографій препаратів різного ступеня подрібненості. За допомогою програми ImageJ [ImageJsoftware] за мікрофотографіями визначалася клітинна фрактальна розмірність вугільних частинок.

Виходячи з того, що формування структури басейну відбувається послідовно від пластичних деформацій до крихких, від мікро-до макродислокацій, розглянуто структуру осадових відкладень на різних масштабних рівнях.

За час формування структури басейну у вугіллі пластів утворилася розвинена мережа ендегенних тріщин (тріщини усихання) — система регіональних (площинних) тріщин кліважу, які в шахтних умовах спостерігаються через 20—30 см; в окремому шматку вугілля, що відокремлюється від пласта у вибої, — через 3—5 см; в аншліф-штупі — через 2—5 мм, під мікроскопом — через 20—600 мкм (рис. 1).

Дослідження мікроструктури вугілля проводилося петрографічним методом за пробами вугільних пластів шахт, розташованих у різних районах Донбасу (поля шахт ім. О.Ф. Засядька, ім. О.О. Скочинського, Кіровська, Краснолиманська). Фрактальна розмірність порушеності вугілля (їхнього гранулометричного складу) визначалася шляхом комп'ютерної обробки мікрофотографій з аншліф-брикетів у програмі ImageJ. Проведені дослідження показали, що вугілля різних пластів (однакового ступеня метаморфізму) характеризуються по-

дібними показниками фрактальної розмірності ( $D_{\text{mikro}}$ ), дисперсного складу та форми мікрочастинок вугілля ( $S, L, dF, M$ ). Обчислені коефіцієнти лінійної кореляції ( $r$ ) показали тісний взаємозв'язок між ними: відповідно,  $r_{DS}=0,76$ ;  $r_{DL}=0,71$ ;  $r_{DdF}=0,70$ ;  $r_{DN}=-0,51$ . Це свідчить про те, що в даному випадку фрактальна розмірність характеризує інтенсивність диспергування вугілля та містить пряму інформацію про просторову структуру об'єкта. Аналіз фрактальних розмірностей вугілля різного ступеня порушеності показав, що розподіл кількості частинок за розмірами з непорушеного вугілля ближче до логнормального закону; з порушеного вугілля та викидонебезпечних зон — до ступеневого. Це, вочевидь, пов'язано з умовами деформування в білогарифмічному масштабі, обидва розподіли (ступеневий і логнормальний) набувають вигляду прямих ліній [Федер, 1991; Булат, Дирда, 2005; Лукінов, Пимоненко, 2008] та відповідають масштабно-незалежному процесу дроблення вугілля, що свідчить про фрактальність мікроструктури та, отже, про можливість застосування фрактальних розмірностей для її аналізу. Фрактальна розмірність мікроструктури вугілля (марки Ж) змінюється від 1,64 (порушене та викидонебезпечне вугілля) до 1,87 (непорушене вугілля).

Розвиток фрактально організованих геологічних об'єктів відбувається у двох напрямках: шляхом укрупнення структур

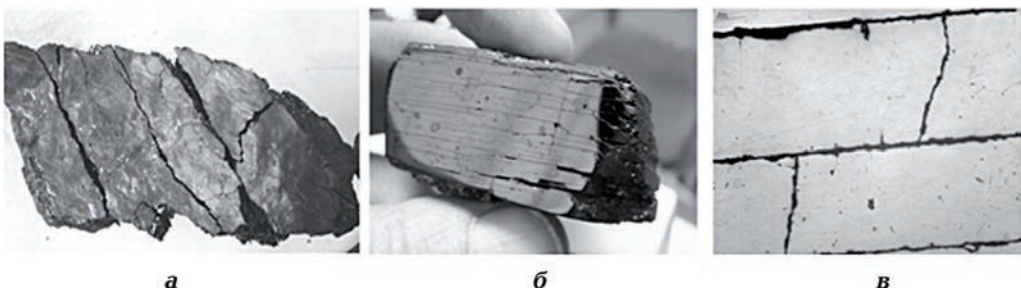


Рис. 1. Тріщинуватість вугілля на різних масштабних рівнях: *а* — окремий шматок вугілля, густота тріщин 3—5 см, *б* — аншліф-штупф, густота тріщин 2—5 мм, *в* — мікрофотографія полірованої поверхні аншліф-штупфа, густота тріщин 20—600 мкм.

Fig. 1. Coal fracture at various scale levels: *a* — a single piece of coal, crack thickness is 3—5 cm, *b* — lump section, crack thickness is 2—5 mm, *v* — micrograph of the polished surface of the lump section, crack thickness is 20—600 microns.

за рахунок їх об'єднання у структури більш нижчих порядків (формування осадових товщ, кристалізація магматичних порід тощо) та шляхом дроблення відносно більш великих структур на структури більш високих порядків (розломо- та тріщиноутворення тощо) [Тверитинова, 2007] (рис. 2). Очевидно, що другий варіант розвитку притаманний вугільним пластам.

Для вугілля Донбасу це також чітко простежується на прикладі аналізу «слідів газогенерації» [Безручко, Барановський, 2014] (рис. 3).

Відомо, що напруги розподіляються у пласті нерівномірно. Деформація відбувається на локалізованих ділянках, при цьому інші ділянки практично не деформуються; розподіл та зміна напружень зон концентрації напружень відбувається у зразках складним чином.

У таких умовах з'являється нерівномірність розподілу механічних напружень, яка може мати хвилеподібний характер і виразно проявляється на мікрорівні (як частини геологічного середовища, рис. 4).

Отримані дані свідчать, що на мікрорівні структура вугілля фрактальна, але на окремих ділянках зустрічаються прояви хвильових процесів (як встановлено раніше, зв'язку між більш порушеними ділянками та частинками з хвилеподібними деформаціями немає [Пимоненко та ін., 2010]). Очевидно, що неоднорідність фізико-механічних властивостей окремих складових вугілля призводить до того, що хвилі напружень переломлюються, відбиваються, змінюються, створюючи локальні умови в кожній окремій частинці.

Лінійні виміри відстаней між тріщинами за площею аншліф-штучка під мікроскопом, виражені графічно (рис. 5), та їх масш-

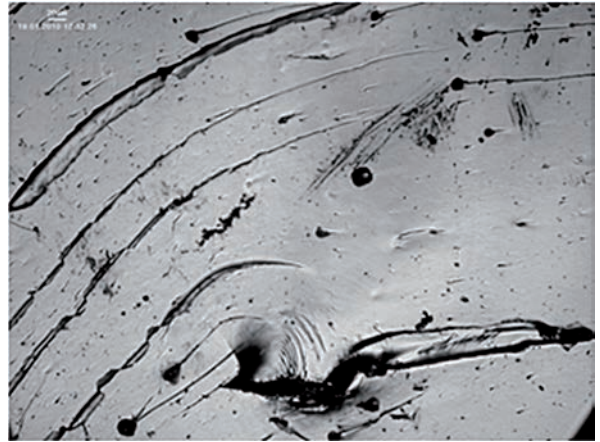


Рис. 2. Перехід (шляхом поглинання) дрібних структур в більш великі.

Fig. 2. Transition (by absorption) of small structures into larger ones.

табна ієрархія (див. рис. 1) дозволяють говорити про дуальний характер (хвильовий та фрактальний) процесів у геологічному середовищі.

У верхній пачці пласта  $l_3$  на шахті ім. О.Г. Стаханова (ДП «Красноармійськвугілля») аналізувалися видимі оком тріщини, а також мікротріщини. Їх кількість та спрямованість визначалися шляхом огляду свіжого вибою (масштаб  $\sim 1$  м), штуфа вугілля (масштаб від перших десятків сантиметрів до кількох міліметрів) та при мікроскопічних дослідженнях орієнтованих аншліфів вугілля (масштаб — частки міліметра). Тріщинуватість в межах трьох порядків зміни лінійного масштабу є фрактальною і  $D_{01}=1,19$ . Аналогічні дослідження проведено на шахтах Центрального та Донецько-Макіївського районів. Фрактальна розмірність  $D_{01}$  змінюється в межах від 1,15 до 1,327.

Дослідження фрактальності порушень в об'ємі вуглепородного масиву проведе-



Рис. 3. Ієрархія розмірів «слідів газогенерації» у вугільних зразках.

Fig. 3. Hierarchy of sizes of «gas generation traces» in coal samples.

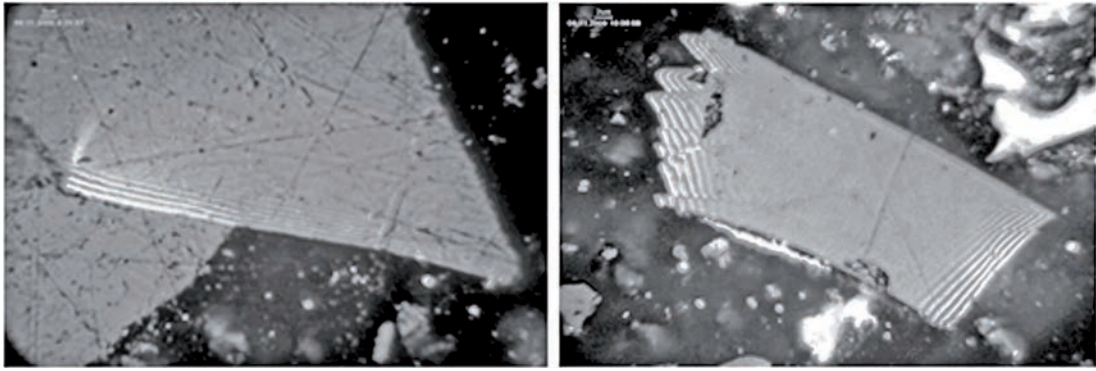


Рис. 4. Хвильоподібний характер перетворення вугільної речовини. Fig. 4. Wave-like nature in the conversion of coal substance.



Рис. 5. Графічне зображення відстаней між тріщинами на поверхні аншліф-штупа вугільного зразка. Fig. 5. Graphic image of distances between cracks on the lump section surface of coal substance.

ні за даними, отриманими сейсмологічним методом на шахті ім. О.Ф. Засядька за допомогою польської системи ARAMIS [Pumonenko et al., 2019]. Сейсмологічні явища обумовлені переважно зародженням тріщин, а інтенсивність енергії акустичного сигналу пропорційна амплітуді. Розташування проєкцій зареєстрованих явищ на площі, їх інтенсивність та кількість дозволили встановити неоднорідність тріщинуватості масиву та виділити найбільш порушені зони. У середньому протягом місяця при відпрацюванні пласта на шахті реєструється 300—400 проявів активності гірського масиву з відносними сейсмічними енергіями від 70 до 200 тис. у.о. На підставі отриманих протягом року результатів спостережень складено базу даних, яка була використана для вивчення неоднорідності розподілу техногенних тріщин.

Кількісна оцінка фрактальності розподілу точок на площині проводилася методом розбивки площі на квадрати (box-counting method), за якими обчислювалася клітинна розмірність ( $D_{02}$ ) [Федер, 1991]. В даному випадку фрактальна розмірність характеризує кількість осередків, заповнених сейсмічними сигналами (тріщинами), не-

залежно від їх інтенсивності, і виступає як кількісна характеристика інтенсивності тріщиноутворення об'єкта. Розрахунки виконувались з використанням програми ImageJ.

Величину фрактальної розмірності визначали для трьох лав у вигляді інтегрального показника, а також у динаміці у міру переміщення вибою кожні два місяці. Встановлено, що найменша середня величина  $D_{02}=1,17$  відзначена у менш порушеній 18-й східній лаві ( $D_{02}=1,27$ ); великі значення характерні для 15-ї східної «біс» лави ( $D_{02}=1,58$ ) та Східної похилої лави ( $D_{02}=1,60$ ). Розраховані величини  $1 < D_{02} < 2$  свідчить про фрактальність техногенного тріщиноутворення в масиві.

При цьому на всіх графіках зміни фрактальної розмірності ( $D_{02}$ ) у часі відзначається загальна закономірність — криві (за аналогічних гірничо-технологічних умов) мають хвилеподібний характер (рис. 6).

Отримані дані підтверджуються дослідженнями формування техногенних колекторів під час відпрацювання вугільних пластів Центрального району Донбасу [Дрібан та ін., 2013]. Автори показали, що на вугільних пластах існують просторово-сполучені зони стиснення та розтягуван-



ня, які характеризуються: близькими за абсолютними значеннями горизонтальними деформаціями; приблизно рівними за площею ділянками, розташованими на однакових відстанях (відстань між максимумами та мінімумами становлять 300—350 м на верхніх горизонтах та до 1000 м на нижніх).

Отже, техногенна тріщинуватість масиву в межах шахтного поля фрактальна, але періодичність її появи в часі носить хвилеподібний характер.

Дослідження латеральної мінливості складчастих порушень Донбасу (аналізувалися складки поздовжнього вигину) проводилося на різних масштабних рівнях: за петрографічними даними, планами гірничих робіт, геологічними картами Донбасу та прилеглими територіями.

За петрографічними даними встановлені окремі зерна з хвилеподібним характером перетворення вугільної речовини,

які зумовлені локальним перерозподілом напруг у пластах вугілля.

У локальних складок, побудованих за планами гірничих робіт і ускладнюючих великі структури (крила Головної антикліналі Донбасу, східна частина Вовчанської синкліналі), довжини півхвиль порядку 1200—1800 м [Забігайло та ін, 1994]. Проведені дослідження показали, що, по-перше, на зміну їх параметрів впливає неоднорідність осадових відкладень, по-друге, генетичний зв'язок між складчастими та середньоамплітудними розривними порушеннями відсутній, що дозволяє припустити різний час їх утворення.

Параметри та форма середньоплітудної складчастості в різних районах розрізняються: довжина півхвиль близько 500 м в Алмазно-Маріївському районі і до 5000 м в Південно-Донбаському. Для північного борту Донбасу характерне віялоподібне розташування складок,

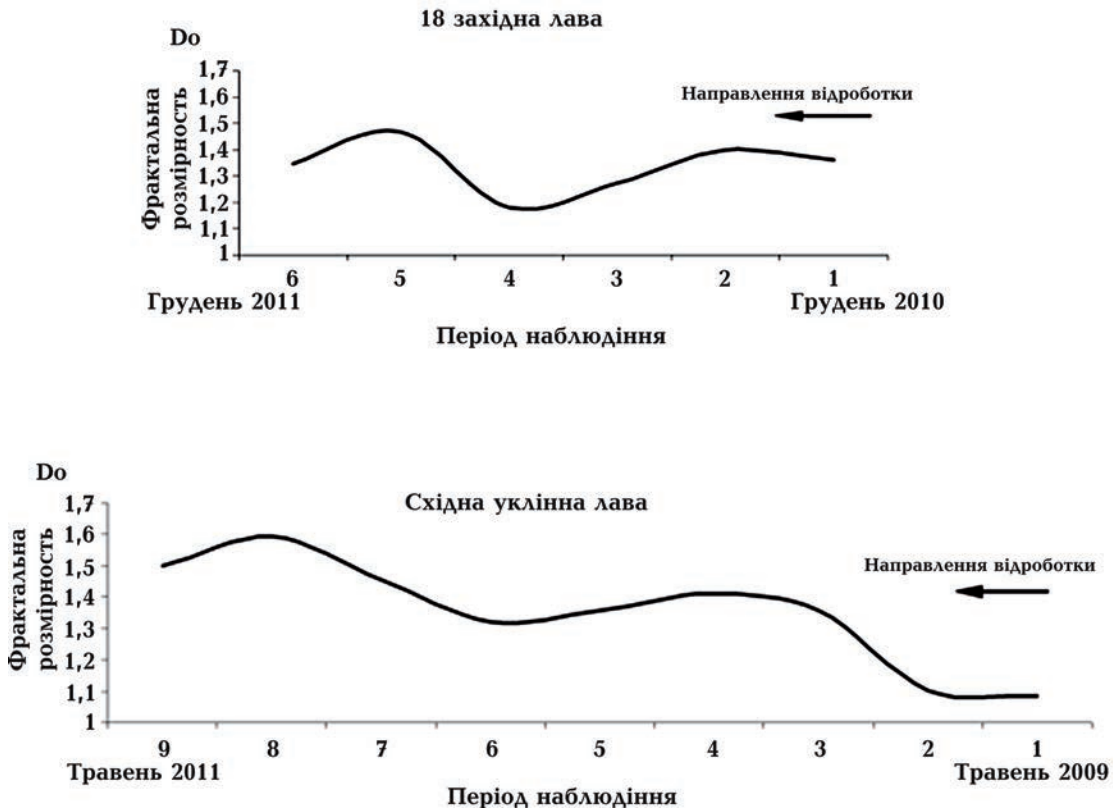


Рис. 6. Зміна фрактальної розмірності в часі при відпрацюванні лав.

Fig. 6. Changing the fractal dimension in time when lava mining.



що свідчить про вплив зсувних зусиль. Практично закономірне чергування регіональних синклінальних і антиклінальних складок ( $\lambda/2=2,5-5$  км) спостерігається на південному сході басейну (м. Морозовськ). На північний захід довжини напівхвиль збільшуються, складки згинаються, зміщуються, що відображає участь у процесі зсувних зусиль і блокових рухів фундаменту (але генетично складки не пов'язані з розломами фундаменту). За виміряними даними, були розраховані середні значення довжин хвиль ( $\lambda$ ) складок поздовжнього вигину для кожного масштабу досліджень. У двічі логарифмічному масштабі побудовано графік залежності півдовжин хвиль складок від масштабу карт (рис. 7), з якого випливає відсутність фракталоутворювальних процесів при утворенні складок.

На всіх масштабних рівнях відзначається латеральна повторюваність складок, обумовлена хвильовими процесами, викликаними імпульсними горизонтальними тектонічними силами в постінверсійний період.

Дослідження фрактальності на макрорівні проводилося за параметрами розривних дислокацій: від глибинних розломів до мікротріщин. Розрахунок щільності: довжин глибинних розломів проведено за «Тектонічною схемою української частини Великого Донбасу» (гл. ред. В.С. Попов, 1968 р.); велико- та середньоамплітудних — за «Геолого-структурною картою доверхнепермських відкладень» масштабу 1:200000 (відп. вик. І.О. Очеретенко, 1980 р.), середньо- та малоамплітудних багатопластових — за «Структурною картою південно-західної частини Донбасу масштабу 1:25000 (під ред. І.О. Очеретенка, М.Л. Левенштейна та ін., 1971); однопластових — за планами гірничих робіт масштабу 1:5000 пласта  $l_3$  шахти «Кочегарка» Центрального району Донбасу. На мікрорівні використовувалися дані тріщинуватості вугілля окремих пластів, отримані методом люмінесцентної дефектоскопії, та мікротріщинуватості.

Формування розривної дислокованості осадової товщі в основному відбувало-

ся в постінверсійний період під дією різних сил і процесів [Забігайло та ін, 1994; Лукінов, Пимоненко, 2008]. Побудовані схеми розподілу інтенсивності розривної порушеності за площею басейну, окремих геолого-промислових районів [Лукінов, Пимоненко, 2008], ділянок та шахт показали нерівномірність її розподілу у просторі та дозволили розрахувати фрактальну розмірність у межах п'яти рівнів (від 0,01 до 1000 м). Як показник інтенсивності розривної порушеності використано показник щільності розривних порушень ( $K_p$ ), рівний відношенню суми довжин дислокацій ( $\Sigma L$ ) до площі квадрата зі стороною ( $\delta$ ), величина якої залежить від масштабу досліджень. На побудованому в біологарифмічному масштабі графіку залежності щільності довжини розривних порушень від масштабу виміру (рис. 8) відзначено два перегини, що дозволило виділити три структурні рівні.

Перший рівень (регіональний) – глибинні розломи. Недостатня кількість даних не дозволила за тангенсом нахилу прямої розрахувати фрактальну розмірність цього класу порушень.

Другий (зональний) рівень характеризується питомою протяжністю велико-, середньо- та малоамплітудних (багатопластових) порушень. Утворення цих порушень пов'язане з розвитком Донецького басейну та зумовлене глобальними геоди-

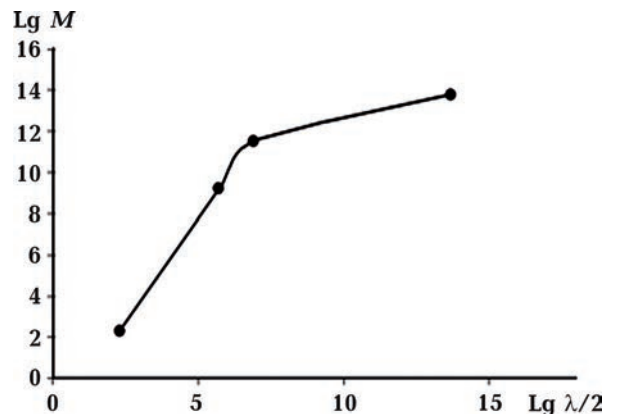


Рис. 7. Графік залежності півдовжин хвиль складок поздовжнього вигину від кроку вимірювань.

Fig. 7. The dependence diagram of wave's half-length of the flexural fold on measurement steps.

наміченими умовами формування регіону.  $D_{\text{макро}}$  визначена за тангенсом нахилу прямої, для цих порушень дорівнює 1,3. Таку ж розмірність мають берегові лінії, протяжність річок [Федер, 1991] та ще інші структури, пов'язані з регіональними природними процесами. Можливо, ця фрактальна розмірність характеризує загальну закономірність природи на даних масштабних рівнях, оскільки русла річок та межі континентів пов'язані з глобальними тектонічними процесами.

Третій (локальний) рівень відображає залежність питомої довжини порушень від мікро-до малоамплітудних однопластових (пласт  $l_3$  на шахті «Кочегарка»). Питома довжина порушень у межах одного пласта фрактальна з розмірністю  $D_{\text{мікро}}=0,66$ .

Обчислені фрактальні розмірності довжин порушень у межах пласта  $l_3$  на різних шахтах становлять: на шахті ім. Ю.О. Гагаріна  $D_{\text{мікро}}=0,46$ , а на шахті «Комсомолец»  $D_{\text{мікро}}=0,38$ . Відмінності отриманих даних можна пояснити тим, що неоднорідний об'єкт (вугілля, пласт, масив) знаходиться в неоднорідному полі нерівнокомпонентних напруг, при цьому процес руйнування здійснюється за рахунок виникнення критичних флуктуацій у локальних різноактивованих зонах. Моделю такого об'єкта є структура, що має велику кількість зовнішніх та внутрішніх концентраторів напруг різного рангу, які створюють локальні ділянки розтягування та стиснення, величини яких залежать не тільки від внутрішніх властивостей об'єкта, а й від властивостей зовнішніх джерел. Така модель пояснює індивідуальність екзогенної (тектонічної) тріщинуватості на різних шахтах, пластах та ділянках одного пласта.

Так, у роботі [Лунг, 1988] на прикладі дослідження фрактальної поверхні тріщин у металах встановлено, що фрактальні розмірності їх змінюються в широкому діапазоні 1,26—2,23, і доведено, що лінійна щільність дислокацій залежить від термомеханічних умов обробки та розмірів зерен. За аналогією можна припустити, що літолого-фаціальні та термодинамічні особливості формування зумовили відмін-

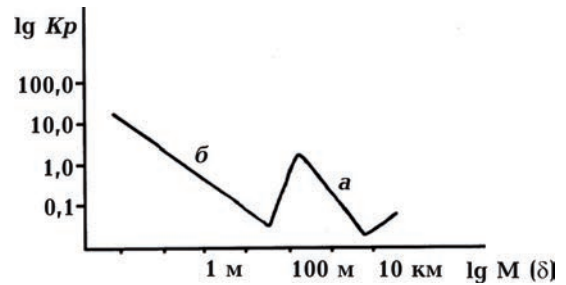


Рис. 8. Схема залежності суми довжини порушень від масштабу: *a* — на макрорівні басейн—район—шахта—багатопластові малоамплітудні порушення; *b* — на макрорівні однопластові малоамплітудні порушення—тріщини—мікропорушення вугілля.

Fig. 8. The dependence diagram in the amount of the length of the deformation: *a* — on the macrolevel basin—district—mine—multibed low-amplitude disturbances; *b* — on the microlevel single-bed low-amplitude disturbances—cracks—micro-deformation of coal.

ність фрактальності геологічного середовища кожного вугільного пласта.

Аналогічним чином у гірничих виробках обчислені фрактальні розмірності для залежностей довжин, кількості порушень, площі поверхні зміщувачів, відстані між тріщинами від масштабу карток для окремих шахт та виробок, вугільних пластів та пісковиків [Булат, Дирда, 2005].

Встановлено, що розподіли розривних порушень у вуглепородному масиві, описані логнормальними та ступеневими законами, свідчать про фрактальність розривної порушеності осадових відкладень Донбасу, а відмінності фрактальних розмірностей на різних масштабних рівнях — про її мультифрактальність. Достовірність отриманих результатів підтверджується подібністю фрактальних розмірностей, розрахованих різними методами. Розбіжність значень фрактальних розмірностей різних масштабних рівнів відображає вплив додаткових локальних чи регіональних чинників, які впливають формування структури басейну.

Розрахована фрактальна розмірність:

– на макрорівні за щільністю велико-, середньо- та малоамплітудних розривних порушень  $D_{\text{макро}}=1,31$ ;

– за точками проявів сейсмічних явищ  $D_{02}=1,17\div 1,58$ ;

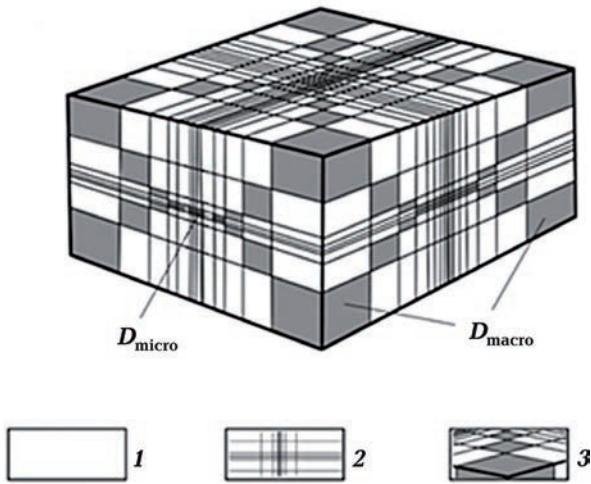


Рис. 9. Схема масштабно-ієрархічної моделі будови вуглепородного масиву: 1 — породний масив-матриця, 2 — системи тріщин, 3 — самоподібні блоки на різних масштабних рівнях.

Fig. 9. Scheme of a scaled-hierarchical model of the coalrock massif structure: 1 — rock massif-matrix, 2 — crack systems, 3 — self-similar blocks at various scale levels.

- за кількістю тріщин безпосередньо в вибоях вугільних пластів  $D_{01}=1,152\div 1,327$ ;
- за картографічними матеріалами різних шахтних полів та пластів  $D_{\text{mikro}}=0,38\div 0,66$ ;
- для вугілля на мікрорівні  $D_{\text{mikro}}=1,64\div 1,87$ .

Фрактальний вуглепородний масив внаслідок неоднорідності складу та структури має складну будову простору дефектів, дислокацій та інших порушень, яку можна представити як систему умовно незв'язаних (умовно взаємопов'язаних) порушень різної форми та розмірів. Розраховані за параметрами розривних дислокацій Донбасу на різних масштабних рівнях фрактальні розмірності дозволили запропонувати феноменологічну самоподібну масштабно-ієрархічну модель вуглепородного масиву (рис. 9).

Запропонована фрактальна структура розривної порушеності має велику кількість зовнішніх та внутрішніх концентраторів напруг різного рангу, які створюють

локальні ділянки розтягування та стиснення, величини яких залежать не тільки від внутрішніх властивостей об'єкта, а й від властивостей зовнішніх джерел. Крім того, значення показника Херста ( $H>0,5$ ), розраховані для вугільної речовини [Пимоненко, Бурчак, 2011], свідчать про персистентність процесів, що її сформували. Іншими словами, вугільна речовина має довготривалу пам'ять і на її сучасний стан вплинули процеси, що відбувалися раніше. Отримані дані підтверджують дію фрактально-хвильових процесів, які, накладаючись на відкладення, що утворилися, сформували надскладну структуру осадової товщі Донбасу.

**Висновки.** Таким чином, геологічному середовищу Донбасу на різних масштабних рівнях притаманні як хвильові, так і фрактальні властивості. Латеральність розривних та складчастих порушень на різних масштабних рівнях відбиває дію хвильових процесів, самоподібність доводить їхній фрактальний характер.

Розбіжності значень фрактальних розмірностей розривних порушень на різних масштабних рівнях пов'язані з додатковими локальними чинниками (мінеральним складом, потужністю і міцністю пластів та ін.), які впливали на формування осадових відкладень.

Природні процеси, що сформували структуру басейну, відбувалися не одночасно: хвильові переважали за певною пластичністю товщі осадових відкладень; фрактальні (дроблення) переважно наклалися на складчасті неоднорідні утворення.

Отже, двоїстість геологічного середовища та персистентність процесів, що сформували її, зумовлювали нелінійність, незворотність тектонічних, фізико-хімічних та інших перетворень гірських порід. Отримані дані свідчать необхідність застосування нових методів вивчення структури басейну, розробки нової методології для подальшого розвитку геологічної науки.

Список літератури

- Баранникова С.А., Горбатенко В.В., Надежкин М.В., Зуев Л.Б. Медленные волновые процессы при сжатии образцов горных пород и щелочно-галлоидных кристаллов. *Вестник ПНИПУ. Механика*. 2012. № 2. С. 8—19.
- Безручко К.А., Барановский В.И. Следы процесса газогенерации в углях Донбасса. *Уголь Украины*. 2014. № 11. С. 31—34.
- Богаченко И.Н. Мегатрещиноватость и прогноз трещинной тектоники и малоамплитудной разрывной нарушенности на разведываемых участках и полях действующих шахт. *Тр. ДонбассНИЛ МГ СССР*. 1971. Вып. 3. С. 39—46.
- Булат А.Ф., Дырда В.И. Фракталы в геомеханике. Киев: Наук. думка, 2005. 357 с.
- Викулин А.В. Физика волнового сейсмического процесса. Петропавловск-Камчатский: Изд-во КГПУ, 2003. 151 с.
- Дрибан В.А., Грищенко Н.Н., Ходырев Е.Д., Дуброва Н.А. Особенности формирования техногенных коллекторов при отработке угольных пластов в условиях ЦРД. *Наук. праці УкрНДМІ НАН України*. 2013. № 13. С. 220—237.
- Забигаило В.Е., Лукинов В.В., Пимоненко Л.И., Сахневич Н.В. Тектоника и горно-геологические условия разработки угольных месторождений Донбасса. Киев: Наук. думка, 1994. 152 с.
- Кочарян Г.Г., Костюченко В.Н., Павлов Д.В. Инициирование деформационных процессов в земной коре слабыми возмущениями. *Физическая мезомеханика*. 2004. Т. 7. № 1. С. 5—22.
- Кочарян Г.Г., Федоров А.Е. Об особенностях механики сейсмического процесса в блочной геофизической среде. *Докл. АН СССР*. 1990. Т. 315. № 6. С. 1345—1349.
- Кузьмин Ю.О. Деформационные автоволны в разломных зонах. *Физика Земли*. 2012. № 1. С. 3—19.
- Лукинов В.В., Пимоненко Л.И. Тектоника метаноугольных месторождений Донбасса. Киев: Наук. думка, 2008. 352 с.
- Лунг И. Фракталы и разрушение металлов с трещинами. В кн.: *Фракталы в физике*. Москва: Мир, 1988. С. 260—265.
- Миланюк С.В. Блоково-ієрархічна модель сейсмічних процесів. *Доп. НАН України*. 2018. № 11. С. 55—62.
- Пимоненко Л.И., Барановский В.И., Пилипенко Ю.Н., Ткаченко А.В. Влияние условий осадконакопления на локализацию малоамплитудных нарушений в угольных пластах. *Геотехническая механика*. 2010. № 91. С. 255—260.
- Пимоненко Л.І., Бурчак О.В. Дослідження фрактальності просторово-часової еволюції вугільної речовини методом Херста. *Наук. праці ДонГТУ. Сер. Гірничо-геологічна*. 2011. № 15(192). С. 233—239.
- Плотников Л.М., Петров А.И. Об отражениях в геологических объектах волновой природы механических напряжений. В кн.: *Давления и механические напряжения в развитии состава, структуры и рельефа литосферы*. Ленинград, 1969. С. 46—50.
- Подурушин В.Ф. Тектоника и особенности нефтегазоносности Геофизического мезовала (север Западной Сибири). *Вести газовой науки: Проблемы ресурсного обеспечения газодобывающих районов России до 2030 г.* 2014. № 3(19). С. 82—88.
- Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. Москва: Наука, 1987. 100 с.
- Тяпкин К.Ф., Кивелюк Т.Т. Изучение разломных структур геолого-геофизическими методами. Москва: Недра, 1982. 239 с.
- Тверитинова Т.Ю. О фрактально-волновой природе геологической среды. 2007. Режим доступа: <http://geo.web.ru/db/msg.html?mid=1179216&uri=tveretanova.html>.
- Федер Е. Фракталы. Москва: Мир, 1991. 254 с.
- Шуман В.Н., Коболев В.П., Старостенко В.И., Буркинский И.Б., Лойко Н.П., Захаров И.Г., Яцута Д.А. Метод спонтанной электромагнитной эмиссии Земли: физические пред-



посылки, элементы теории, полевые эксперименты. *Геофиз. журн.* 2012. Т. 34. № 4. С. 40—61. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v34i4.2012.116749>.

ImageJsoftware. [Electronic resource]. Retrieved from <http://rsb.info.nih.gov/ij/html>. Title from the screen.

Pymonenko, L., Karhapolov, A., Kuznetsova, L., Prykhodchenko, O., & Hunia, D. (2019). Geo-

logical factors of gassing of the east inclined longwall # 3 of m3 bed at O.F. Zasiadko mine. *E3S Web of Conferences*, 109, 00078. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900078>.

Sherman, S.I. (2013). Deformation waves as a trigger mechanism of seismic activity in seismic zones of the continental lithosphere. *Geodynamics & Tectonophysics*, 4(2), 83—117. <https://doi.org/10.5800/GT-2013-4-2-0093>.

## Fractal-wave nature of the geological environment of coal formation at Donbas

**K.A. Bezruchko, L.I. Pimonenko, A.A. Kargapolov, V.G. Baranovskiy, 2022**

M.S. Polyakov's Institute of Geotechnical Mechanics, National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine

The structure investigation of the fault and folded deformations of sedimentary deposits at Donbas on various scale levels: from microdislocations to large amplitude ones is carried out. It is established that on all scale levels, the lateral frequency of the folds resulting from the wave processes caused by pulsed horizontal tectonic forces in the post-inversion period is seen. According to the parameters of natural and technogenic fault dislocations of Donbas, the authors calculated fractal dimensions for dependencies of lengths, the number of deformations, the surface area of shifters, the distance between the cracks from the scale of maps for individual mines and workings, coal beds and sandstones. The measurements were carried out on micrographs of coal particles, in mining workings, according to the geological maps of Donbas and individual districts. The distributions of fault deformations in the coalrock massif are described by lognormal and power laws, which indicates the fractality of the fault deformation of sedimentary deposits at Donbas, and the differences of fractal dimensions at various scale levels point at its multifractality. The accuracy of the obtained results is confirmed by the similarity of fractal dimensions calculated by various methods. The discrepancy between the values of fractal dimensions at the different scale levels reflects the impact of additional local or regional factors affecting the formation of the basin framework. The obtained data attest to the action of fractal-wave processes, which, being superpositioned on the resulting deposits, formed a complex structure of the sedimentary thickness of Donbas.

**Key words:** geological environment, sedimentary deposits, coalrock massif, wave processes, fractal dimension.

### References

- Barannikova, S.A. Gorbatenko, V.V., Nadezhkin, M.V., & Zuev, L.B. (2012) Slow wave processes during compression of rock samples and alkaline-haloid crystals. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta*, (2), 8—19 (in Russian).
- Bezruchko, K.A., & Baranovskiy, V.I. (2014). Traces of the gas generation process in the coals of Donbass. *Ugol' Ukrainy*, (11), 31—34 (in Russian).
- Bogachenko, I.N. (1971). Mega-fracturing and forecast of fracture tectonics and low-amplitude rupture dislocation in explored areas and fields of operating mines. *Trudy DonbassNIL MG USSR*, (3), 39—46 (in Russian).
- Bulat, A.F., & Durda, V.I. (2005). *Fractals in geo-*

- mechanics*. Kiev: Naukova Dumka, 357 p. (in Russian).
- Vikulin, A.V. (2003). *Physics of the wave seismic process*. Petropavlovsk-Kamchatsky: KGPU Publishing House, 151 p. (in Russian).
- Driban, V.A., Grishchenkov, N.N., Khodyrev, E.D., & Dubrova, N.A. (2013). Features of the formation of technogenic reservoirs during the development of coal seams in the conditions of the central heating center. *Naukovi pratsi UkrND-MI NAN Ukrainy*, (13), 220—237 (in Russian).
- Zabigaylo, V.E., Lukinov, V.V., Pimonenko, L.I., & Sakhnevich, N.V. (1994). *Tectonics and mining and geological conditions for the development of Donbass coal deposits*. Kiev: Naukova Dumka, 152 p. (in Russian).
- Kocharyan, G.G., Kostyuchenko, V.N., & Pavlov, D.V. (2004). Initiation of deformation processes in the earth's crust by weak disturbances. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 7(1), 5—22 (in Russian).
- Kocharyan, G.G., & Fedorov, A.E. (1990). On the features of the mechanics of the seismic process in a block geophysical environment. *Doklady AN SSSR*, 315(6), 1345—1349 (in Russian).
- Kuzmin, Yu.O. (2012). Deformation autowaves in fault zones. *Fizika Zemli*, (1), 3—19 (in Russian).
- Lukinov, V.V., & Pimonenko, L.I. (2008). *Tectonics of methane coal deposits of Donbass*. Kiev: Naukova Dumka, 352 p. (in Russian).
- Lung, I. (1988). Fractals and fracture of metals with cracks. In *Fractals in physics* (pp. 260—265). Moscow: Mir (in Russian).
- Myhaniuk, S.V. (2018). Block-and-architecture model of seismic processes. *Dopovidi NAN Ukrainy*, (11), 55—62 (in Ukrainian).
- Pimonenko, L.I., Baranovskiy, V.I., Pilipenko, Yu.N., & Tkachenko, A.V. (2010). Influence of sedimentation conditions on the localization of low-amplitude disturbances in coal seams. *Geotekhnicheskaya mekhanika*, (91), 255—260 (in Russian).
- Pymonenko, L.I., & Burchak, O.V. (2011). Investigation of fractality of spatio-temporal evolution of coal matter by the method of Hearst. *Naukovi pratsi DonHTU. Ser. Hirnycho-heolohichna*, (15), 233—239 (in Ukrainian).
- Plotnikov, L.M., & Petrov, A.I. (1969). On reflections in geological objects of the wave nature of mechanical stresses. In *Pressures and mechanical tensions in the development of the composition, structure and topography of the listosphere* (pp. 46—50). Leningrad (in Russian).
- Podurushin, V.F. (2014). Tectonics of the geophysical mezoval (North of the Western Siberia). *Vesti gazovoy nauki: Problemy resursnogo obespecheniya gazodobyvayushchikh rayonov Rossii do 2030 g.*, (3), 82—88 (in Russian).
- Sadovskiy, M.A., Bolkhovitinov, L.G., & Pisarenko, V.F. (1987). *Deformation of the geophysical environment and the seismic process*. Moscow: Nauka, 100 p. (in Russian).
- Tyapkin, K.F., & Kivelyuk, T.T. (1982). *Study of fault structures by geological and geophysical methods*. Moscow: Nedra, 239 p. (in Russian).
- Tveritina, T.Yu. (2007). On the fractal-wave nature of the geological environment. Retrieved from <http://geo.web.ru/db/msg.html?mid=1179216&uri=tveritina.html> (in Russian).
- Feder, E. (1991). *Fractals*. Moscow: Mir, 254 p. (in Russian).
- Shuman, V.N., Kobolev, V.P., Starostenko, V.I., Burkinskiy, I.B., Loyko, N.P., Zakharov, I.G., & Yatsiuta, D.A. (2012). A method of analysis of spontaneous electromagnetic emission of the Earth: physical backgrounds, elements of theory, field experiment. *Geofizicheskij Zhurnal*, 34(4), 40—61. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v34i4.2012.116749> (in Russian).
- ImageJsoftware. [Electronic resource]. Retrieved from <http://rsb.info.nih.gov/ij/html>. Title from the screen.
- Pymonenko, L., Karhapolov, A., Kuznetsova, L., Prykhodchenko, O., & Hunia, D. (2019). Geological factors of gassing of the east inclined longwall # 3 of m3 bed at O.F. Zasiadko mine. *E3S Web of Conferences*, 109, 00078. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900078>.
- Sherman, S.I. (2013). Deformation waves as a trigger mechanism of seismic activity in seismic zones of the continental lithosphere. *Geodynamics & Tectonophysics*, 4(2), 83—117. <https://doi.org/10.5800/GT-2013-4-2-0093>.