

Навігація та геоінформаційні системи

УДК 528.88 + 515.127.1

doi: 10.26906/SUNZ.2026.2.005

Р. Е. Пащенко

Інститут радіофізики та електроніки імені О. Я. Усикова НАН України, Харків, Україна

ЛОКАЛІЗАЦІЯ АНОМАЛІЙ НА КОСМІЧНИХ ЗНІМКАХ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ ЗЕМЕЛЬ ЗА ДОПОМОГОЮ ПОБУДОВИ “ПІРАМІДИ” ФРАКТАЛЬНИХ РОЗМІРНОСТЕЙ

Анотація. З використанням інформації, що отримується з космічних засобів дистанційного зондування Землі, можна оцінювати негативний стан сільськогосподарських земель які проявляються у вигляді різноманітних аномалій. **Предметом** дослідження є оцінка можливості локалізації аномалій на космічних знімках з використанням “піраміди” фрактальних розмірностей. **Об’єктом** дослідження є космічні знімки сільськогосподарських земель, які отримані з супутника Sentinel-2 з аномаліями і без аномалій. **Метою** є оцінка можливості локалізації аномалій на космічних знімках сільськогосподарських земель з використанням фрактального аналізу. **Отримані наступні результати.** Розглянуто можливість локалізації аномалій на космічних знімках сільськогосподарських земель з використанням “пірамідалного” фрактального аналізу. Створення “піраміди” космічних знімків здійснюється за рахунок розподілу вихідного космічного знімку на знімки менших розмірів, які у подальшому індексуються. Під час побудови “піраміди” фрактальних розмірностей для кожного знімка “піраміди” космічних знімків розраховується середня (мінімальна) фрактальна розмірність з використанням “ковзаючого вікна”, тобто “вікна”, що рухається по космічному знімку з кроком переміщення, який дорівнює одиниці. **Висновки.** Застосування “піраміди” середніх (мінімальних) фрактальних розмірностей дозволяє локалізувати аномалії на космічних знімках, якщо величини середніх (мінімальних) фрактальних розмірностей космічних знімків на кожному рівні “піраміди” менше $D = 2,9$, то на них є аномалії. За допомогою фрактального аналізу космічних знімків без аномалій показано, що, якщо середні (мінімальні) фрактальні розмірності на всіх рівнях “піраміди” більше фрактальної розмірності $D = 2,9$, то на космічному знімку аномалій немає. На деякі особливості на космічному знімку вказують менші середні (мінімальні) фрактальні розмірності на нижчих рівнях “піраміди” порівняно з вищими рівнями “піраміди”.

Ключові слова: моніторинг стану сільськогосподарських земель; космічні знімки; аномалія; фрактальна розмірність.

Вступ

Агроекологічний моніторинг дозволяє проводити дослідження впливу природних, техногенних і антропогенних чинників на стан сільськогосподарських земель [1]. Дія всіх цих чинників може привести до негативних наслідків стану землі, її деградації та погіршення врожайності. Оцінити негативний стан і структуру сільськогосподарських земель також можна з використанням інформації, що отримується з космічних засобів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) [2]. На космічних знімках ділянки землі, що мають ознаки деградації, проявляються у вигляді різноманітних аномалій.

Сучасні супутники ДЗЗ можуть отримувати інформацію про стан земної поверхні у різних діапазонах хвиль, тобто отримувати багатоспектральні космічні знімки. Просторова роздільна здатність таких космічних знімків може дорівнювати 10-30 м, а періодичність їх отримання – один знімок у 5-8 діб на задану територію. Найбільш розповсюдженими космічними знімками, які використовуються для розв’язання різноманітних задач ДЗЗ і, які є у вільному доступі у мережі Інтернет, є космічні знімки супутників Sentinel-2 [3] і Landsat-8 [4].

В останні десятиріччя все частіше для оцінки стану і структуру земельних ділянок та посівних площ, а також для аналізу аномальних ділянок на

космічних знімках застосовуються методи фрактального аналізу зображень [5, 6]. Розрахунок фрактальних розмірностей дозволяє за їх величиною розрізнати складність структури земних поверхонь на космічних знімках. При цьому можна використовувати космічні знімки супутників ДЗЗ в одному діапазоні хвиль. У роботах [6, 7] розглянуто можливість аналізу стану посівів кукурудзи та інших сільськогосподарських культур на різних фазах вегетації з використанням фрактального аналізу космічних знімків. У цих роботах досліджено як змінюються величини середніх фрактальних розмірностей космічних знімків полів засіяних кукурудзою, соняшником, гречкою, пшеницею і ячменем, але у цих роботах не розглядається можливість моніторингу змін стану сільськогосподарських земель.

У роботі [8] показано можливість моніторингу змін стану сільськогосподарських земель під впливом різних чинників за даними фрактального аналізу і наведено як візуалізація поля фрактальних розмірностей дозволяє наочно показати зміну стану сільськогосподарських земель та межі аномалій на знімках. Але у цій роботі не розглядається можливість локалізації і визначення розмірів аномальних ділянок на космічних знімках.

Таким чином, перспективним напрямком досліджень є оцінка можливості застосування фрактального аналізу для локалізації аномальних ділянок

на космічних знімках земель сільськогосподарського призначення.

Мета статті: розглянути можливість локалізації аномалій на космічних знімках сільськогосподарських земель з використанням фрактального аналізу.

Побудова “піраміди” космічних знімків сільськогосподарських земель

Розглянемо можливість локалізації аномальних ділянок сільськогосподарських земель на космічних знімках супутника Sentinel-2. При цьому вихідні космічні знімки були отримані з мережі Інтернет і на них були візуально визначені об’єкти дослідження – поля з аномаліями і без аномалій. Далі були визначені їх розміри і після цього здійснено вирізання зображень розміром 56x56 пікселів. На рис. 1 наведено вихідний космічний знімок каналу b8 супутника Sentinel-2 поля з пшеницею з аномаліями.

На рис. 1 видно, що на вихідному знімку поля з пшеницею візуально спостерігаються дві аномалії, перша знаходиться зверху праворуч на знімку, а друга – ліворуч у середині знімка.

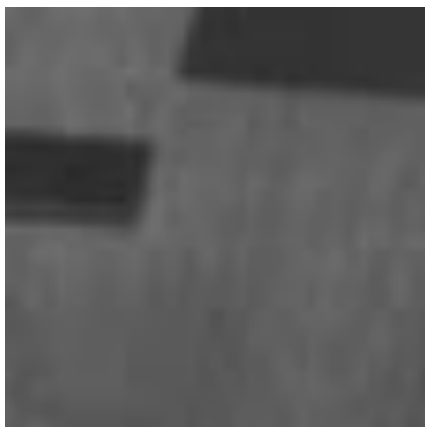


Рис. 1. Космічний знімок поля з пшеницею з аномаліями розмірами 56x56 пікселів

Далі була створена “піраміда” космічних знімків, коротко розглянемо порядок її побудови. На початку вихідний космічний знімок розміром 56x56 пікселів розбивається на чотири квадранти. Таким чином будується перший рівень “піраміди” – чотири знімки розміром 28x28 пікселів. На другому рівні “піраміди” отримуємо шістнадцять знімків розміром 14x14 пікселів, а на третьому рівні – шістдесят чотири знімка розміром 7x7 пікселів. Також під час створення “піраміди” космічних знімків здійснюється індексація знімків. Вихідний знімок розміром 56x56 пікселів має індекс 1, на першому рівні “піраміди” космічні знімки мають індекси 111, 112, 113, 114, а на другому рівні – індекси 11111, 11112, 11121, 11122, 11211, 11212, 11211, 11222, 11311, 11312, 11321, 11322, 11411, 11412, 11421, 11422 і так далі. Такий порядок побудови “піраміди” космічних знімків еквівалентний застосуванню “стрибаючого вікна” під час аналізу космічного знімка. При цьому крок переміщення дорівнює розміру знімка на кожному рівні “піраміди”.

На рис. 2 наведено чотири космічні знімки першого рівня “піраміди” розміром 28x28 пікселів.

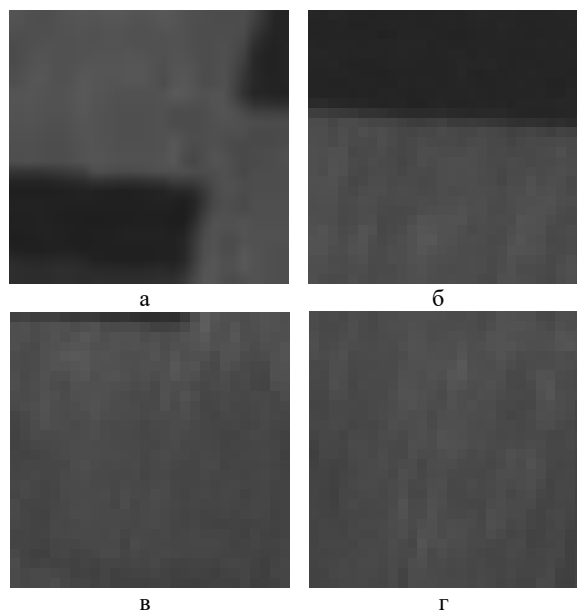


Рис. 2. Елементи вихідного космічного знімка (першого рівня “піраміди”) поля з пшеницею з аномаліями розмірами 28x28 пікселів: перший (а); другий (б); третій (в) і четвертий (г) квадранти

Як видно на рис. 2, аномалії є на трьох знімках першого рівня “піраміди” з чотирьох. На першому знімку дві аномалії, на другому знімку присутня велика аномальна ділянка, яка займає майже половину знімка. На третьому знімку невеличка аномалія є зверху, а на четвертому – аномалій немає. На рис. 3 наведено шістнадцять космічних знімків другого рівня “піраміди” розміром 14x14 пікселів.

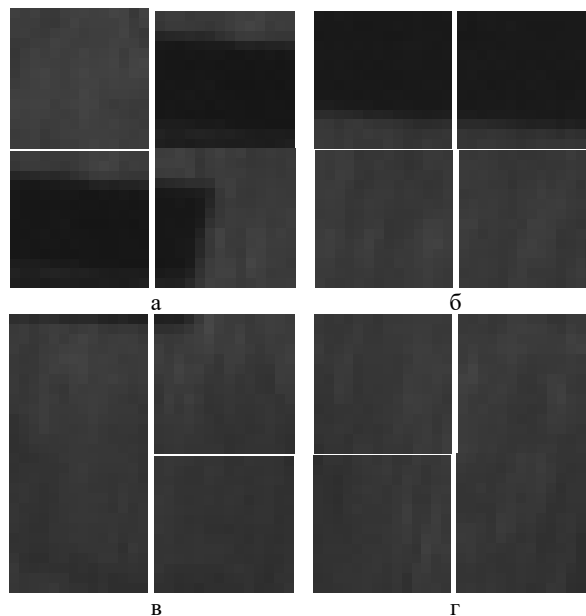


Рис. 3. Елементи вихідного космічного знімка (другого рівня “піраміди”) поля з пшеницею з аномаліями розмірами 14x14 пікселів: перший (а); другий (б); третій (в) і четвертий (г) квадранти космічних знімків першого рівня “піраміди”

Як видно на рис. 3, на трьох (другому, третьому, четвертому) космічних знімках другого рівня “піраміди”, які відповідають першому знімку пер-

шого рівня “піраміди” є аномалії, а на першому космічному знімку аномалій немає. На другому і третьому космічних знімках аномалії займають майже всі знімки другого рівня “піраміди”.

На рис. 3 також видно, що на перших двох космічних знімках другого рівня “піраміди”, що відповідають другому знімку першого рівня, є аномалії. На обох космічних знімках аномалії займають майже всі знімки другого рівня “піраміди”. Але на третьому і четвертому космічних знімках другого рівня “піраміди”, що відповідають другому знімку першого рівня, аномалії відсутні. Також на перших двох космічних знімках другого рівня “піраміди” (див. рис. 3), що відповідають третьому знімку першого рівня “піраміди” є невеличкі аномалії зверху, а третьому і четвертому космічних знімках другого рівня “піраміди” аномалій немає. На всіх космічних знімках другого рівня “піраміди” (див. рис. 3), які відповідають четвертому знімку першого рівня “піраміди” аномалії відсутні. На рис. 4 наведено частка (шістнадцять) космічних знімків третього рівня “піраміди” розміром 7x7 пікселів.

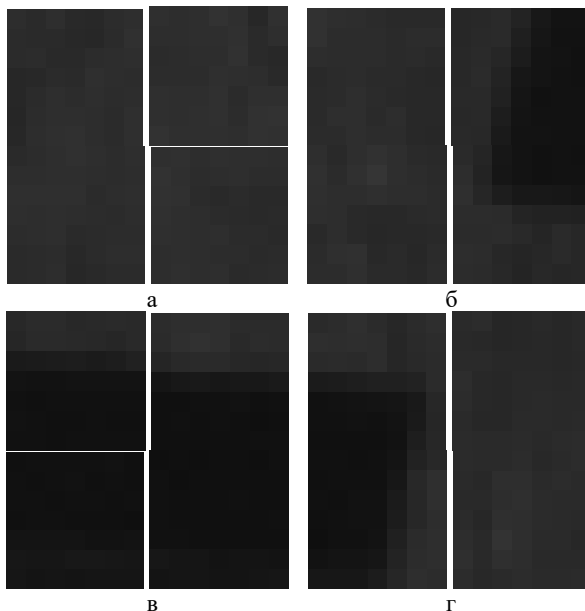


Рис. 4. Елементи вихідного космічного знімка (третього рівня “піраміди”) поля з пшеницею з аномаліями розмірами 7x7 пікселів: перший (а); другий (б); третій (в) і четвертий (г) квадранти чотирьох верхніх лівих космічних знімків другого рівня “піраміди”

Як видно на рис. 4, на всіх космічних знімках третього рівня “піраміди”, які відповідають першому знімку другого рівня аномалій немає. На рис. 4 також видно, що на двох (другому і четвертому) космічних знімках третього рівня “піраміди”, що відповідають другому знімку другого рівня “піраміди” є аномалії. Найбільша аномалія спостерігається на другому космічному знімку. Також необхідно зазначити, що на першому і третьому космічному знімку третього рівня “піраміди” аномалій немає. На всіх космічних знімках третього рівня “піраміди” (див. рис. 4), що відповідають третьому знімку другого рівня “піраміди” є аномалії. Але на першому і другому знімках аномалія займає майже весь знімок, а на третьому і четвертому

космічних знімках аномалія займає всі знімки і вони є однорідними, тому можна вважати, що під час їх подальшого аналізу на них аномалій немає. На двох (першому і третьому) космічних знімках третього рівня “піраміди”, що відповідають четвертому знімку другого рівня “піраміди” (див. рис. 4) присутні аномалії. Найбільша аномалія знаходиться на третьому космічному знімку. На другому і четвертому космічних знімків третього рівня “піраміди” аномалій немає.

Проведемо обробку космічних знімків супутника Sentinel-2 поля з пшеницею з аномаліями і без аномалій з використанням фрактального аналізу. Побудуємо “піраміди” фрактальних розмірностей космічних знімків цих полів, а також розглянемо можливість локалізації на них аномальних ділянок.

Побудова “піраміди” фрактальних розмірностей космічних знімків сільськогосподарських земель

Фрактальні розмірності є дробовими величинами, які характеризують складність структури космічного знімка, і їх можна розраховувати за допомогою методу покриття [9], або методу призми [10], які найчастіше застосовують у практичному застосуванні. Під час застосування методу покриття [9] для розрахунку фрактальної розмірності тривимірне подання космічного знімка заповнюється (покривається) кубами певних розмірів. Довжини сторін кубів ϵ змінюються декілька разів. Для кожної з довжин сторін визначається сумарна кількість кубів $N(\epsilon)$, що використовувалися для покриття знімка. За отриманими даними будується графік логарифмічної залежності $\log N(\epsilon)$ від $\log 1/\epsilon$, який апроксимується за методом найменших квадратів (будується пряма за набором точок). Фрактальна розмірність D визначається, як тангенс кута нахилу отриманої прямої.

Порядок розрахунку фрактальної розмірності з використанням методу призми [10] є подібним до розрахунку за методом покриття. Але замість сумарної кількості кубів $N(\epsilon)$ використовується площина $P(\epsilon)$ верхньої грані призми, яка будується за даними яскравості зображення. Під час розрахунку також обираються декілька довжин ϵ основи призми і будується графік логарифмічної залежності $\log P(\epsilon)$ від $\log 1/\epsilon$ (апроксимована пряма). Далі, як і у методі покриття, фрактальна розмірність D визначається, як тангенс кута нахилу отриманої прямої.

Під час побудови “піраміди” фрактальних розмірностей для кожного знімка “піраміди” космічних знімків розраховується середня (мінімальна) фрактальна розмірність з використанням “ковзаючого вікна” розміром 4x4 пікселя. Тобто для кожного “вікна”, що рухається по космічному знімку з кроком переміщення, який дорівнює одиниці, визначається фрактальна розмірність, а далі отримані фрактальні розмірності усереднюються (знаходиться мінімальна фрактальна розмірність). Після цього середні (мінімальні) фрактальні розмірності індексуються і зберігаються у пам’яті комп’ютера. При цьому індексація “піраміди” середніх (мінімальних) фрактальних розмірностей співпадає з індексацією “піраміди” космічних знімків.

Розраховані з використанням методу покриття середні фрактальні розмірності (ФР) для “ковзаючого вікна” розміром 4x4 пікселя і проіндексовані згідно “піраміди” космічних знімків наведено нижче:

- вихідного космічного знімка поля з пшеницею з аномаліями $D1 = 2,944$;

- першого рівня “піраміди” – $D111 = 2,905$;
 $D112 = 2,929$; $D121 = 2,953$; $D122 = 2,962$;

- другого рівня “піраміди” – $D11111 = 2,956$;
 $D11112 = 2,880$; $D11121 = 2,897$; $D11122 = 2,902$;
 $D11211 = 2,875$; $D11212 = 2,910$; $D11221 = 2,950$;
 $D11222 = 2,955$; $D12111 = 2,936$; $D12112 = 2,922$;
 $D12121 = 2,957$; $D21122 = 2,969$; $D21211 = 2,959$;
 $D12212 = 2,940$; $D12221 = 2,959$; $D12222 = 2,944$;

- частки 3 рівня “піраміди” – $D1111111 = 2,937$;
 $D1111112 = 2,930$; $D1111121 = 2,965$; $D1111122 = 2,940$;
 $D1111211 = 2,929$; $D1111212 = 2,889$; $D1111221 = 2,892$;
 $D1111222 = 2,770$; $D1112111 = 2,788$; $D1112112 = 2,835$;
 $D1112121 = 2,948$; $D1112122 = 2,956$; $D1112211 = 2,892$;
 $D1112212 = 2,926$; $D1112221 = 2,905$; $D1112222 = 2,942$.

Для спрощення аналізу отриманих середніх ФР їх краще подати у вигляді таблиці. Для космічного знімка поля з пшеницею з аномаліями “піраміду” середніх ФР наведено у табл. 1.

Під час виявлення аномалій на космічних знімках сільськогосподарських земель будемо проводити порівняння величин середніх ФР на різних рівнях “піраміди” космічних знімків. Можна вважати, що аномалій на космічному знімку немає, якщо на нижчих рівнях “піраміди” середні ФР не відрізняються у першому знаку після коми від середніх ФР на вищому рівні. Аномальні ділянки на космічному знімку присутні, якщо середні ФР розрізняються у першому знаку після коми на різних рівнях “піраміди”.

Таблиця 1 – “Піраміда” середніх фрактальних розмірностей космічного знімка поля з пшеницею з аномаліями для “вікна” 4x4 пікселя

D	1				
1	2,944				
11	1	2			
1	2,905	2,929			
2	2,953	2,962			
111	1	2	12	1	2
1	2,956	2,880	1	2,875	2,910
2	2,897	2,902	2	2,950	2,955
21	1	2	22	1	2
1	2,936	2,922	1	2,959	2,940
2	2,957	2,969	2	2,959	2,944
1111	1	2			
1	2,956	2,880			
2	2,897	2,902			
11111	1	2	112	1	2
1	2,937	2,930	1	2,929	2,889
2	2,965	2,940	2	2,892	2,770
121	1	2	122	1	2
1	2,788	2,835	1	2,892	2,926
2	2,948	2,956	2	2,905	2,942

Особливістю фрактальної розмірності, яка розраховується за методом покриття, є те, що чим однорідніше зображення, тим більше її величина і для однорідних зображень наближається до 3,0.

Як видно у табл. 1, середня ФР вихідного знімка дорівнює $D1 = 2,944$, що більше більше 2,9 і зробити висновок про наявність на ньому аномалій

неможливо. За величиною середньої ФР можна тільки сказати, що космічний знімок майже однорідний. Тобто виявити аномалії на космічному знімку, використовуючи тільки одне значення середньої ФР, не можливо. Аналіз даних у табл. 1 також показує, що на першому рівні “піраміди” середні ФР першого і другого космічних знімків ($D111 = 2,905$; $D112 = 2,929$) менше середньої ФР всього вихідного космічного знімка ($D1 = 2,944$), можна зробити висновок, що свідчить на них є аномалії. Середні ФР третього і четвертого знімків ($D121 = 2,953$; $D122 = 2,962$) більше середньої ФР всього вихідного знімка, що свідчить про відсутність на них аномалій. Але для третього знімка середня ФР не значно відрізняється від середньої ФР вихідного знімка. Необхідно зазначити, що меншими величинами середніх ФР відповідають більші аномальні ділянки. Так на першому знімку наявні дві аномалії (рис. 2, а) і для нього середня ФР на першому рівні “піраміди” мінімальна $D111 = 2,905$ (табл. 1).

Проведемо аналіз середніх ФР космічних знімків другого рівня “піраміди”. Як видно у табл. 1 три середні ФР космічних знімків ($D1112 = 2,880$; $D11121 = 2,897$; $D11122 = 2,902$), що відповідають першому знімку першого рівня “піраміди” менше середньої ФР $D111 = 2,905$, що свідчить про наявність на них аномалій. Найменші середні ФР відповідають другому і третьому космічним знімкам, на яких аномалії займають майже всі знімки рис. 3, а). Для першого космічного знімку другого рівня “піраміди” середня ФР дорівнює $D1111 = 2,956$, що більше і $D111 = 2,905$ і можна сказати, що на ньому аномалій немає.

У табл. 1 також видно, що для двох перших космічних знімків другого рівня “піраміди”, що відповідають другому знімку першого рівня “піраміди” середні ФР ($D11211 = 2,875$; $D11212 = 2,910$) менше середньої ФР $D112 = 2,929$, тобто на них є аномалії (див. рис. 3, б). На цих знімках аномалії займають майже всю їх поверхню. Середні ФР третього і четвертого космічних знімків другого рівня “піраміди” дорівнюють $D11221 = 2,950$ і $D11222 = 2,955$, що більше за $D112 = 2,929$. Такі величини середніх ФР свідчать про відсутність на них аномалій (рис. 3, б).

Середні ФР перших двох космічних знімків другого рівня “піраміди” (див. табл. 1) ($D12111 = 2,936$; $D12112 = 2,922$), що відповідають третьому знімку першого рівня “піраміди” менше середньої ФР $D121 = 2,953$, що відповідає наявності на них аномалій (див. рис. 3, в). Середні ФР третього і четвертого космічного знімку другого рівня “піраміди” більше $D121 = 2,953$ і аномалій на них немає (рис. 3, в). Середні ФР всіх космічних знімків другого рівня “піраміди”, які відповідають четвертому знімку першого рівня “піраміди” менше $D122 = 2,962$, але візуально на космічних знімках аномалії не спостерігаються (рис. 3, г). Тобто можна зробити висновок, що на них є особливості, які візуально не помітні. Таким чином, аналіз середніх ФР другого рівня “піраміди” показує, що вони дозволяють локалізувати аномалії, а також виявити особливості, які візуально на космічному знімку не помітні.

За допомогою побудови третього рівня “піраміди” середніх ФР можна проводити подальшу локалізацію аномалій на космічному знімку. У табл. 1 для прикладу наведено четверта частина (шістнадцять) середніх ФР третього рівня “піраміди”, яка відповідає першому верхньому зліва квадранту вихідного космічного знімку.

Як видно з даних табл. 1, середні ФР трьох космічних знімків третього рівня “піраміди” ($D_{1111111} = 2,937$; $D_{1111112} = 2,930$; $D_{1111122} = 2,940$), які відповідають першому знімку другого рівня “піраміди”, менше середньої ФР $D_{11111} = 2,956$, тобто на них є особливості, які візуально не помітні (рис. 4, а). Одна середня ФР космічного знімка третього рівня “піраміди” ($D_{1111222} = 2,770$), що відповідає другому знімку другого рівня “піраміди” менше середньої ФР $D_{11112} = 2,880$ і одна середня ФР ($D_{1111212} = 2,889$) близька до неї, і така їх поведінка вказує на те, що на них є аномалії (див. рис. 4, б). Також необхідно зазначити, що середні ФР першого і третього космічного знімку третього рівня “піраміди” більші $D_{11112} = 2,880$ і на цих знімках аномалії не спостерігаються (рис. 4, б).

Дві середні ФР космічних знімків третього рівня “піраміди” (табл. 1) ($D_{1112111} = 2,788$; $D_{1112112} = 2,835$), що відповідають третьому знімку другого рівня “піраміди” менше середньої ФР $D_{11121} = 2,897$ і на них є аномалії (рис. 4, в). Середні ФР третього і четвертого космічних знімків третього рівня “піраміди” дорівнюють $D_{1112121} = 2,948$ та $D_{1112122} = 2,956$ і вони більше $D_{11121} = 2,897$, тобто такі значення середніх ФР свідчать, що аномалій на них немає. Але на цих космічних знімках є аномалії і вони займають всі ці знімки розміром 7×7 і тому вони не виявляються як аномальні, але ці аномалії були виявлені на вищих рівнях “піраміди” (рис. 4, в).

Середні ФР першого і третього космічних знімків третього рівня “піраміди”, що відповідають четвертому знімку другого рівня “піраміди” дорівнюють $D_{1112211} = 2,892$ і $D_{1112221} = 2,905$, що менше або близько до середньої ФР $D_{11122} = 2,902$, тобто на цих знімках є аномалії (див. рис. 4, г). Середні ФР другого і четвертого космічних знімків третього рівня “піраміди” (див. табл. 1) є більшими за $D_{11122} = 2,902$ і на цих знімках аномалій немає (рис. 4, г). Таким чином, застосування “піраміди” середніх ФР дозволяє локалізувати аномалії на космічних знімках, якщо величини середніх ФР космічних знімків на кожному рівні “піраміди” менше $D = 2,9$, то на них є аномалії.

Розглянемо можливість локалізації аномалій на космічних знімках з використанням “піраміди” мінімальних ФР, яку наведено у табл. 2. У табл. 2 видно, що мінімальна ФР вихідного знімка дорівнює $D_{m1} = 2,678$ (середня ФР $D_1 = 2,944$) і це значення менше $D = 2,9$ (різниця у першому знаку після коми склала $\Delta D = 0,3$), тобто, якщо мінімальна ФР менше $2,9$, то це може свідчити про наявність на космічному знімку аномалії. Така поведінка мінімальної ФР може використовуватися для виявлення аномалій на космічному знімку і у подальшому для їх локалізації.

Таблиця 2 – “Піраміда” мінімальних фрактальних розмірностей космічного знімка поля з пшеницею з аномаліями для “вікна” 4×4 пікселя

D	1				
1	2,678				
1	1	2			
1	2,633	2,693			
2	2,868	2,929			
11	1	2	12	1	2
1	2,937	2,678	1	2,661	2,763
2	2,791	2,786	2	2,914	2,933
21	1	2	22	1	2
1	2,886	2,849	1	2,936	2,916
2	2,907	2,952	2	2,914	2,921
11	1	2			
1	2,937	2,678			
2	2,791	2,786			
111	1	2	112	1	2
1	2,937	2,930	1	2,929	2,889
2	2,965	2,940	2	2,892	2,770
121	1	2	122	1	2
1	2,788	2,835	1	2,892	2,926
2	2,948	2,956	2	2,959	2,942

З аналізу даних у табл. 2 також видно, що на першому рівні “піраміди” мінімальні ФР першого і другого космічних знімків менші або близькі до мінімальної ФР вихідного космічного знімка і менше $D = 2,9$ на $\Delta D = 0,3$, тобто на них є аномалії. Для третього і четвертого знімків мінімальні ФР (див. табл. 2) більше мінімальної ФР всього вихідного знімка, але для третього знімка мінімальна ФР не значно, але менше $D = 2,9$, тобто на ньому є невелика аномалія. Для четвертого знімка мінімальна ФР більше $D = 2,9$ і на ньому аномалій немає.

Таким чином, під час використання мінімальних ФР для виявлення аномалій на космічних знімках можна вважати, що, якщо величина мінімальної ФР менше $D = 2,9$, то на космічному знімку є аномалії. Цей висновок підтверджується такою ж поведінкою мінімальних ФР на другому і третьому рівнях “піраміди” (див. табл. 2). Візуально проконтролювати наявність аномалій на космічних знімках можна на рис. 2-4.

Розглянемо яку поведінку мають “піраміди” середніх (мінімальних) ФР під час аналізу космічних знімках без аномалій. На рис. 5 наведено космічний знімок супутника Sentinel-2 (канал b8) поля з пшеницею без аномалій розмірами 56×56 пікселів.

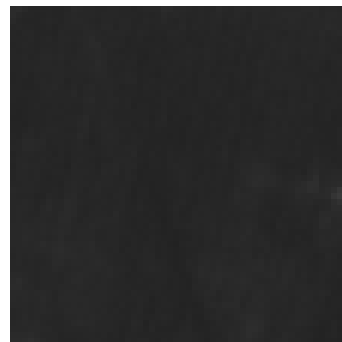


Рис. 5. Космічний знімок супутника Sentinel-2 поля з пшеницею без аномалій розмірами 56×56 пікселів

У табл. 3 наведено “піраміду” середніх ФР для космічного знімка поля з пшеницею без аномалій.

Таблиця 3 – “Піраміда” середніх фрактальних розмірностей космічного знімка поля з пшеницею без аномалій для “вікна” 4x4 пікселя

D	1				
1	2,968				
1	1	2			
1	2,965	2,970			
2	2,964	2,957			
11	1	2	12	1	2
1	2,973	2,963	1	2,973	2,966
2	2,965	2,970	2	2,965	2,973
21	1	2	22	1	2
1	2,955	2,964	1	2,967	2,938
2	2,952	2,973	2	2,956	2,963
11	1	2			
1	2,973	2,963			
2	2,965	2,970			
111	1	2	112	1	2
1	2,955	2,976	1	2,997	2,955
2	2,958	2,978	2	2,950	2,973
121	1	2	122	1	2
1	2,946	2,969	1	2,981	2,958
2	2,953	2,943	2	2,974	2,967

На рис. 5 видно, що на космічному знімку поля з пшеницею візуально аномалії не спостерігаються, а у табл. 3 видно, що середня ФР всього знімка дорівнює $D_1 = 2,968$. Така величина середньої ФР більше фрактальної розмірності $2,9$ ($D > 2,9$) і, як зазначалося вище, це може бути ознакою, що на космічному знімку аномалій немає. Аналіз даних табл. 3 показує, що середні ФР на першому рівні “піраміди” ($D_{11} = 2,965$; $D_{112} = 2,970$ і $D_{121} = 2,964$, $D_{122} = 2,957$) більше $2,9$ і близькі до середньої ФР вихідного космічного знімка $D_1 = 2,968$ і цю підтверджує, що на космічному знімку аномалій немає. Але необхідно зазначити, що середня ФР четвертого знімка є незначно меншою середньої ФР вихідного космічного знімка, що може вказувати на наявність на ньому деяких особливостей, але не аномалій. У табл. 3 також видно, що середні ФР всіх космічних знімків другого рівня “піраміди” більше фрактальної розмірності $D = 2,9$ і це також підтверджує відсутність на них аномалій. Необхідно зазначити, що на другому рівні “піраміди” також є середні ФР які менше середніх ФР першого рівня “піраміди”, але не аномальні. Тобто на космічних знімках, яким відповідають ці середні ФР, можуть бути деякі особливості. Характер поведінки середніх ФР всіх космічних знімків третього рівня “піраміди” (див. табл. 3) такі ж самі, як і на другому рівні, тобто більше фрактальної розмірності $D = 2,9$. Таким чином, проведений аналіз дозволяє зробити висновок, що якщо середні ФР на всіх рівнях “піраміди” більше фрактальної розмірності $D = 2,9$, то на космічному знімку аномалій немає. На деякі особливості на знімку вказують менші середні ФР на нижчих рівнях “піраміди” порівняно з вищими рівнями “піраміди”.

Розглянемо можливість аналізу космічних знімків без аномалій з використанням “піраміди” мінімальних ФР, яку наведено у табл. 4. Аналіз даних у табл. 4 по-

казує, що на першому рівні “піраміди” мінімальні ФР трьох перших знімків більше мінімальної ФР вихідного космічного знімка, що свідчить про відсутність на них аномалій. Для другого і третього знімків першого рівня “піраміди” мінімальні ФР більше $D = 2,9$, тобто вони більш однорідні. У табл. 4 також видно, що мінімальні ФР всіх знімків на другому і третьому рівнях “піраміди” (крім однієї) більше фрактальної розмірності $D = 2,9$, тобто на них аномалій немає. Як і для середніх ФР, на деякі особливості на космічному знімку вказують менші мінімальні ФР на нижчих рівнях “піраміди” порівняно з вищими її рівнями.

Таблиця 4 – “Піраміда” мінімальних фрактальних розмірностей космічного знімка поля з пшеницею без аномалій для “вікна” 4x4 пікселя

D	1				
1	2,811				
1	1	2			
1	2,892	2,940			
2	2,907	2,791			
11	1	2	12	1	2
1	2,909	2,925	1	2,939	2,928
2	2,926	2,934	2	2,931	2,936
21	1	2	22	1	2
1	2,928	2,941	1	2,922	2,803
2	2,925	2,946	2	2,909	2,931
11	1	2			
1	2,909	2,925			
2	2,926	2,934			
111	1	2	112	1	2
1	2,927	2,934	1	2,994	2,931
2	2,927	2,934	2	2,937	2,967
121	1	2	122	1	2
1	2,917	2,931	1	2,934	2,953
2	2,947	2,937	2	2,937	2,960

Таким чином, результати фрактального аналізу показали, що за допомогою “пірамід” ФР можна здійснювати локалізацію аномалій на космічному знімку і досліджувати на них невеликі особливості.

Висновки

Оцінити негативний стан і структуру сільськогосподарських земель можна з використанням інформації, що отримується з космічних засобів дистанційного зондування Землі. На космічних знімках ділянки землі, що мають ознаки деградації, проявляються у вигляді різноманітних аномалій. Фрактальні розмірності є дробовими величинами, які характеризують складність структури космічного знімка, і їх можна розраховувати за допомогою методу покриття, або методу призми. Розглянуто можливість локалізації аномалій на космічних знімках сільськогосподарських земель з використанням “пірамідалного” фрактального аналізу. Під час побудови “піраміди” фрактальних розмірностей для кожного знімка “піраміди” космічних знімків розраховується середня фрактальна розмірність з використанням “ковзаючого вікна”. Тобто для кожного “вікна”, що рухається по космічному знімку з кроком переміщення, який дорівнює одиниці, визначається фрактальна розмірність, а далі отримані фрактальні розмірності усереднюються. Показано, що застосування “пі-

раміди” середніх фрактальних розмір-ностей дозволяє локалізувати аномалії на космічних знімках, якщо величини середніх (мінімальних) фрактальних розмірностей космічних знімків на кожному рівні “піраміди” менше $D=2,9$, то на них є аномалії. За допомогою фрактального аналізу космічних знімків без аномалій показано, що, якщо середні (мінімальні) фрактальні розмірності на всіх рівнях “піраміди” більше фрактальної розмірності $D=2,9$, то на космічному знімку аномалій немає. На деякі особливості на космічному знімку вказують менші середні (мінімальні) фрактальні розмірності на нижчих рівнях “піраміди” порівняно з вищими рівнями “піраміди”. Під час подальших досліджень доцільно розглянути можливість

локалізації аномалій на космічних знімках з використанням розрахунку фрактальних розмірностей у “вікні” з розмірами, що дорівнюють розмірам знімків на кожному рівні “піраміди” космічних знімків.

Конфлікт інтересів. Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів стосовно даного дослідження, в тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в даній статті.

Використання засобів штучного інтелекту. Автор підтверджує, що не використовував технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Тараріко О.Г., Сиротенко О.В., Ільєнко Т.В., Кучма Т.Л. Агроєкологічний супутниковий моніторинг. К.: Аграрна наука, 2019. 204 с. URL: <https://agroeco.org.ua/vydannya/agroekologichnij-sputnikovij-monitoring>
2. Yang L., Lu B., Schmidt M., Natesan S. et al. Applications of remote sensing for crop residue cover mapping. Smart Agricultural Technology. 2025. №. 11. P. 1 – 14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.1008080>
3. Copernicus Europe’s eyes on Earth, Sentinel-2. Copernicus Europe’s eyes on Earth [Electronic resource]. URL: <https://www.copernicus.eu/en/about-copernicus/infrastructure/discover-our-satellites>
4. Landsat 8 Bands: Combinations For Satellite Images. URL: <https://eos.com/blog/band-combinations-for-landsat-8/>
5. Feder J. Fractals. New York: Springer US, 1988. 263 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-2124-6>
6. Марюшко М.В., Пащенко Р.Е. Фрактальний аналіз космічних знімків SENTINEL-2 для моніторингу сільськогосподарських культур. Радіоелектронні і комп’ютерні системи. 2020. №4(96). С. 34–47. DOI: <https://doi.org/10.32620/reks.2020.4.03>
7. Пащенко Р.Е., Марюшко М.В. Оцінка стану різних сільськогосподарських культур з використанням фрактального аналізу. Сучасні інформаційні системи. 2023. Т. 7, № 3. С. 81–88. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2023.3.12>
8. Пащенко Р.Е., Марюшко М.В. Моніторинг змін стану сільськогосподарських земель за даними фрактального аналізу космічних знімків. Системи управління, навігації та зв'язку. 2021. Вип. 3(65). С. 8–17. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2021.3.008>
9. Crowner R.M. Introduction to Fractals and Chaos. London: Jones and Bartlett Publishers, Inc, 1995. 352 p. URL: <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA210257.pdf>
10. Clarke K.C. Computation of the Fractal Dimension of Topographic Surface Using the Triangular Prism Surface Area Method. Computers & Geosciences. 1986. Vol. 12. № 5. P. 713–722. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0098300486900476>

Received (Надійшла) 21.01.2026

Accepted for publication (Прийнята до друку) 18.04.2026

Publication date (Дата публікації) 22.05.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ/ ABOUT THE AUTHORS

Пащенко Руслан Едуардович – доктор технічних наук, професор, старший науковий співробітник відділу дистанційного зондування Землі, Інститут радіофізики та електроніки імені О.Я. Усикова НАН України, Харків, Україна;
Ruslan Pashchenko – Doctor of Technical Sciences, Professor, Senior research scientist of Department remote sensing of the Earth, O.Ya. Usikov Institute for Radio physics and Electronics of the NAS of Ukraine, Kharkov, Ukraine,
 e-mail: r.paschenko@i.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0001-6218-0324>;
 Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=58126357500>.

Localization anomalies on the spaces pictures of agricultural earths by construction “pyramid” of fractals dimensions

Ruslan Pashchenko

Abstract. With the use information that turns out from the remote sensing of Earth spaces facilities, it is possible to estimate the negative state of agricultural earths which show up as the varied anomalies. The **subject** of the study in the article is estimation possibility localization anomalies on spaces pictures with the use “pyramid” of fractals dimensions. The **object** of the study are agricultural earths spaces pictures with anomalies and without anomalies which are got from a satellite Sentinel-2. The **aim** is to assess possibility localization anomalies on the agricultural earths spaces pictures with use fractal analysis. The **following results were obtained.** Possibility localization anomalies is considered on agricultural earths spaces pictures with the use “pyramidal” fractal analysis. Creation “pyramid” of spaces pictures is carried out due to the division the base space picture on the less sizes pictures which in subsequent are indexed. During construction “pyramid” of fractals dimensions for every picture “pyramid” of spaces pictures a middle (minimum) fractal dimension settles accounts with the use of “sliding window”, that “window”, that moves on a space picture with the moving step, which equals to unit. **Conclusions.** Application “pyramid” of middle (minimum) fractals dimensions allows to localize anomalies on spaces pictures, if sizes middle (minimum) fractals dimensions spaces pictures at every level “pyramid” less $D=2,9$, there are anomalies on them. By the fractal analysis of spaces pictures without anomalies showed that, if middle (minimum) fractals dimensions at all levels “pyramid” more fractal dimension $D=2,9$, on the space picture anomalies it is not. On some features on a space picture specify less middle (minimum) fractals dimension at lower levels “pyramid” comparatively with the higher levels “pyramid”.

Keywords: monitoring the state of agricultural earths; space pictures; anomaly; fractal dimension.