

Навігація та геоінформаційні системи

УДК 528.88 + 515.127.1

doi: 10.26906/SUNZ.2026.1.005

Р. Е. Пащенко¹, М. В. Марюшко²

¹ Інститут радіофізики та електроніки імені О. Я. Усикова НАН України, Харків, Україна

² Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна

ОЦІНКА РОЗМІРІВ АНОМАЛІЙ НА КОСМІЧНИХ ЗНІМКАХ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ ЗЕМЕЛЬ З ВИКОРИСТАННЯМ ФРАКТАЛЬНИХ РОЗМІРНОСТЕЙ

Анотація. У теперішній час сільськогосподарські роботи виконуються з високою динамікою і оцінка їх результатів потребує постійного моніторингу. **Предметом** дослідження є оцінка можливості визначення розмірів аномальних ділянок поля на космічних знімках з використанням фрактальних розмірностей, що розраховуються у «вікна» різних розмірів. **Об'єктом** дослідження є сільськогосподарські землі на яких проводилися роботи та які зафіксовані на космічних знімках супутника Sentinel-2. **Метою** є оцінка впливу розмірів «вікна» на величини фрактальних розмірностей космічних знімків під час моніторингу сільськогосподарських земель для визначення розмірів аномальних ділянок на них. **Отримані такі результати.** Досліджено вплив розмірів «вікна», яке бере участь у побудові поля фрактальних розмірностей, на величини мінімальних, максимальних і середніх значень фрактальних розмірностей космічних знімків сільськогосподарських земель на яких походилися роботи. Поступове збільшення, а потім зменшення різниць середніх фрактальних розмірностей під час збільшенні розмірів «вікна» характеризує наявність світлих і темних ділянок на космічному знімку, що обумовлені проведенням сільськогосподарських робіт. За зміною різниць мінімальних фрактальних розмірностей можна оцінити розміри світлих ділянок на космічному знімку, а за зміною різниць максимальних фрактальних розмірностей – темних ділянок. **Висновки.** Використання «вікон» різного розміру під час фрактального аналізу дозволяє визначати розміри різних аномальних структур на космічному знімку за рахунок зміни різниць мінімальних, максимальних і середніх фрактальних розмірностей.

Ключові слова: моніторинг стану сільськогосподарських земель, космічні знімки, фрактальна розмірність, аномальна ділянка.

Вступ

Для отримання інформації про стан і структуру земельних ділянок та посівних площ і виявлення ділянок землі, що мають ерозійні порушення, а також інші види деградації землі, доцільно здійснювати моніторинг сільськогосподарських земель [1]. Крім того, у теперішній час сільськогосподарські роботи виконуються з високою динамікою і оцінка їх результатів потребує постійного моніторингу. Для виявлення фактів впливу природних, техногенних і антропогенних факторів на посіви сільськогосподарських культур також використовується агроекологічний моніторинг [2].

Для проведення регулярного космічного моніторингу земель сільськогосподарського призначення використовуються дані дистанційного зондування Землі (космічні знімки), які можуть отримуватися з періодичністю 5-8 діб. Космічні знімки, що використовуються для вирішення цих завдань, мають просторову роздільну здатність 10-30 м [1]. На супутниках дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) розміщують різноманітні датчики, які дозволяють відображати стан рослинності на великих площах. Наприклад, на супутниках Sentinel-2 розташована знімальна апаратура MSI (Multispectral Instrument), яка дозволяє отримувати широкосмугові мультиспектральні зображення (13 спектральних діапазонів) з просторовим розподілом 10 м [3]. Космічні знімки супутника Sentinel-2 в мережі Інтернет можна отримувати 2 рази

на тиждень на задану територію. Необхідно зазначити, що для організації моніторингу сільськогосподарських земель важливим є не тільки отримання даних дистанційного зондування Землі ДЗЗ, але й спосіб обробки космічних знімків. Спосіб обробки космічних знімків впливає на достовірність одержуваних результатів, і залежно від цього користувачі зможуть приймати ефективні управлінські рішення.

У теперішній час гіперспектральна зйомка широко використовуються для моніторингу та оцінки стану підстильної поверхні [1], а розрахунок спектральних параметрів поглинання рослинності з використанням спеціальних алгоритмів аналізу таких знімків дозволяє покращити якість їх дослідження. Але для отримання гіперспектральних знімків необхідна складна апаратура великої вартості, а складні алгоритми обробки таких знімків впливають на достовірність отриманих даних.

У теперішній час часто застосовуються методи фрактального аналізу зображень для підвищення інформативності космічних знімків під час моніторингу земної поверхні [4, 5]. Оцінити складність структури поверхонь можна за величиною фрактальних розмірностей цифрових зображень. Методи фрактального аналізу дають можливість використовувати зображення в одному діапазоні хвиль, що спрощує отримання космічних знімків. У роботах [6, 7] описано, як для оцінки стану сільськогосподарських культур на різних фазах вегетації застосовується фрактальний аналіз космічних знімків супу-

тника Sentinel-2. Але питання моніторингу змін стану сільськогосподарських земель в цих роботах не розглядаються. Можливість використання фрактального аналізу космічних знімків для визначення змін стану сільськогосподарських полів під впливом різних чинників розглянута у роботі [8], але у цій роботі не розглядається можливість визначення розмірів аномальних ділянок на космічних знімках. Тобто застосування фрактального аналізу для визначення розмірів ділянок поля на яких проводяться сільськогосподарські роботи є перспективним напрямком досліджень і аналіз впливу розмірів «вікна» під час розрахунку величин фрактальних розмірностей космічних знімків у цих умовах є актуальним.

Мета статті: оцінити вплив розмірів «вікна» на величини фрактальних розмірностей космічних знімків під час моніторингу сільськогосподарських земель для визначення розмірів аномальних ділянок на них.

Характеристика космічних знімків сільськогосподарських земель

Для виявлення та оцінки аномальних ділянок сільськогосподарських земель на космічних знімках користувачам необхідно витратити багато часу для їх моніторингу. Розглянемо можливість оцінки стану сільськогосподарських земель з використанням космічних знімків супутника Sentinel-2. Зазначені космічні знімки є у вільному доступі у мережі Інтернет [3].

Для оцінки розмірів аномалій на космічних знімках сільськогосподарських земель будемо застосовувати окремі космічні знімки земель Вільхуватської сільської ради Чутівського району Полтавської області (землі приватного сільськогосподарського підприємства «Дружба») [9]. Зазначені космічні знімки мають просторове розрізнення 10 метрів і були отримані протягом 2018 року. Для спрощення подальших досліджень було вибрано тільки одне поле, як к було засіяне кукурудзою. На цьому полі проводилися польові роботи і на космічних знімках виникли аномальні ділянки.

На рис. 1 наведено елементи знімків поля з кукурудзою, які були вирізані з космічних знімків супутника Sentinel-2 (канал b8), у різні дати: 04.06.2018 (а); 29.06.2018 (б); 29.07.2018 (в); 23.08.2018 (г).

На рис. 1, а і б (04.06.2018; 29.06.2018) видно, що структура елементів космічних знімків (відтінки градації сірого) відрізняються для різних дат. Так на початку червня спостерігаються більш світлі градації сірого, а у кінці червня відтінки сірого стають темними. На рис. 1, в (29.07.2018) видно, що у кінці липня на полі, яке досліджується, проводилися польові роботи. На космічному знімку з'явилися аномальні ділянки і спостерігається зміна градацій сірого та їх нерівномірність. У кінці серпня (рис. 1, г, 23.08.2018) польові роботи на полі вже було завершено і космічний знімок знову має однорідні градації сірого, але вони більш темні. Розглянемо як відображається динаміка проведення польових робіт на космічних знімках (у кінці липня і на початку серпня).

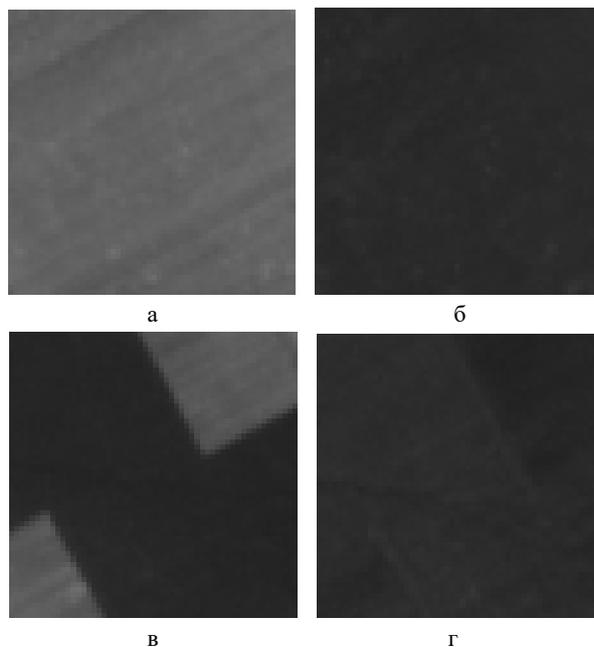


Рис. 1. Елементи космічних знімків (канал b8 супутника Sentinel-2) поля з кукурудзою станом на: 04.06.2018 (а); 29.06.2018 (б); 29.07.2018 (в); 23.08.2018 (г)

На рис. 2 наведено елементи космічних знімків супутника Sentinel-2 (канал b8), які показують динаміку польових робіт на полі з кукурудзою для чотирьох дат: 29.07.2018 (а); 05.08.2018 (б); 08.08.2018 (в); 10.08.2018 (г).

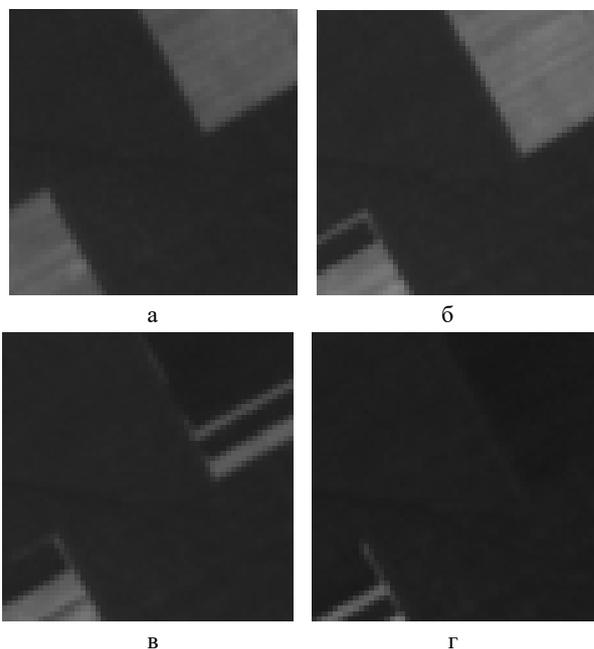


Рис. 2. Елементи космічних знімків (канал b8 супутника Sentinel-2) поля, засіяного кукурудзою, на якому проводилися польові роботи станом на: 29.07.2018 (а); 05.08.2018 (б); 08.08.2018 (в); 10.08.2018 (г)

Як видно на рис. 2, розміри ділянок з різною структурою для чотирьох дат будуть різні. На рис. 2, а і б розміри світлих ділянок практично однакові, на рис. 2, в видно, що товщина (не довжина) світлих ділянок зменшується, крім того

вони мають шарувату структуру, а на рис. 2, г світлі ділянки мають невеликі розміри і розміщуються у лівому нижньому куті космічного знімка.

Таким чином, візуальний аналіз космічних знімків сільськогосподарських земель на яких проводилися роботи (зміна їх стану) дозволяє лише констатувати, що роботи проводилися. Але визначити розміри аномалій, які спостерігаються на космічних знімках (розміри ділянок на яких були проведені сільськогосподарські роботи), за результатами візуального аналізу не можливо.

Проведемо обробку космічних знімків супутника Sentinel-2, розглянутого вище поля, засіяного кукурудзою, з використанням фрактального аналізу і розглянемо вплив розмірів «вікна» на величини фрактальних розмірностей. Також розглянемо можливість визначення розмірів аномальних ділянок на космічних знімках з використанням фрактальних розмірностей, що розраховуються у «вікнах» різних розмірів.

Оцінка розмірів аномалій на космічних знімках сільськогосподарських земель з використанням фрактальних розмірностей

Космічний знімок, отриманий з супутника ДЗЗ, можна розглядати, як матрицю значень інтенсивності відбиття світлової хвилі (сонячного випромінювання) від поверхні землі. Земна поверхня є різномірною структурою і кожна точка підстильної поверхні має власні властивості, які по різному впливають на параметри світлової хвилі. Завдяки цьому інформація, яку несе світлова хвиля про об'єкт спостереження, по різному відображається на космічному знімку.

Під час оброблення космічних знімків супутника Sentinel-2 поля з кукурудзою на якому проводилися роботи будемо будувати поле фрактальних розмірностей (ПФР). У роботі [5] процес побудови ПФР розглянуто детально. Для побудови ПФР вибирається «вікно» певного розміру і з використанням цього «вікна» проводиться сканування космічного знімка. На кожному кроці сканування (для кожного положення «вікна») визначається числове значення фрактальної розмірності. Таким чином отримується набір фрактальних розмірностей, який створює матрицю D , так зване «поле фрактальних розмірностей». Під час проведення досліджень розміри елемента космічного знімку дорівнювали 56×56 пікселів, а розміри «ковзаючого вікна» змінювалися від 4×4 пікселі до 32×32 пікселі.

У теперішній час існує велика кількість типів фрактальних розмірностей [4], які відрізняються методами їх розрахунку. Але всі методи визначення фрактальних розмірностей базуються підрахунку об'єму або площі форми підстильної поверхні і оцінки того, як ця форма змінюється у різних масштабах. Найчастіше для дослідження цифрових зображень (космічних знімків) застосовують метод покриття [10] і метод призми визначення фрактальної розмірності [5].

Метод покриття розрахунку фрактальної розмірності призначений для визначення розмірності Гаусдорфа-Безіковича за допомогою такого виразу:

$$D_1 = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log N(\varepsilon)}{\log(1/\varepsilon)}, \quad (1)$$

де ε – довжина сторони куба (максимальна довжина може дорівнювати розміру «вікна»), яким покривають цифрове зображення; $N(\varepsilon)$ – кількість кубів з довжиною сторони ε , що містить тривимірне подання зображення.

Метод призми розрахунку фрактальної розмірності використовує для визначення розмірності наступний вираз:

$$D_2 = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log P(\varepsilon)}{\log(1/\varepsilon)}, \quad (2)$$

де ε – довжина сторони основи зрізаної призми (максимальна довжина може дорівнювати розміру «вікна»); $P(\varepsilon)$ – площа поверхні призми (її верхньої грані) з довжиною сторони її основи ε .

Коротко розглянемо порядок визначення фрактальних розмірностей за допомогою методу покриття і методу призми. Спочатку у методі покриття вибирається деякий куб, довжина сторони якого дорівнює ε , і цим кубом покривається тривимірне подання космічного знімка. А потім визначається кількість кубів з довжиною сторони ε , що накривають весь космічний знімок $N(\varepsilon)$.

Під час реалізації методу призми спочатку з використанням даних про яскравості космічного знімка у кутах «вікна» розміром ε будується верхня грань призми, а потім визначається (розраховується) її площа $P(\varepsilon)$.

У подальшому для методу покриття і методу призми розраховуються значення $N(\varepsilon)$ і $P(\varepsilon)$, відповідно, для декількох інших величин ε . Якщо, наприклад, величини дорівнюють $\varepsilon_2 = \varepsilon_1/2$, $\varepsilon_3 = \varepsilon_1/4$, $\varepsilon_4 = \varepsilon_1/8$, то отримують по чотири значення $N(\varepsilon)$ і $P(\varepsilon)$. Кількість значень може бути різною і залежить від структури (форми) підстильної поверхні, що відображена на космічному знімку.

Після отримання значень $N(\varepsilon)$ і $P(\varepsilon)$ в методі покриття і методі призми будуються графіки логарифмічної залежності $\log N(\varepsilon)$ або $\log P(\varepsilon)$, відповідно, від $\log 1/\varepsilon$. За побудованими точками виконується лінійна апроксимація з використанням методу найменших квадратів (МНК). Використання МНК для апроксимації забезпечує автоматизацію отримання фрактальних розмірностей. Визначивши тангенс кута нахилу апроксимованої прямої заходиться величина фрактальної розмірності D .

Для візуалізації отриманого ПФР космічного знімка можна здійснити розподіл всього діапазону змін фрактальних розмірностей на ПФР, розбиваючи його на декілька рівнів. Кожен рівень розбиття можна відобразити певним кольором. Фрактальні розмірності з близькими числовими значеннями об'єднуються в окремі області і таким чином здійснюється сегментація космічного знімка за величиною фрактальної розмірності [8].

На рис. 3, а-г наведено візуальні подання ПФР побудовані для космічних знімків поля, засіяного кукурудзою (рис. 2, а-г), на якому проводилися польові роботи, станом на: 29.07.18 (а), 05.08.18 (б),

08.08.18 (в), 10.08.18 (г). Побудова ПФР цих космічних знімків здійснювався з використанням методу призми і «ковзаючого вікна» розміром 5×5 пікселів. Весь діапазон змін фрактальних розмірностей розподілявся на 5 рівнів.

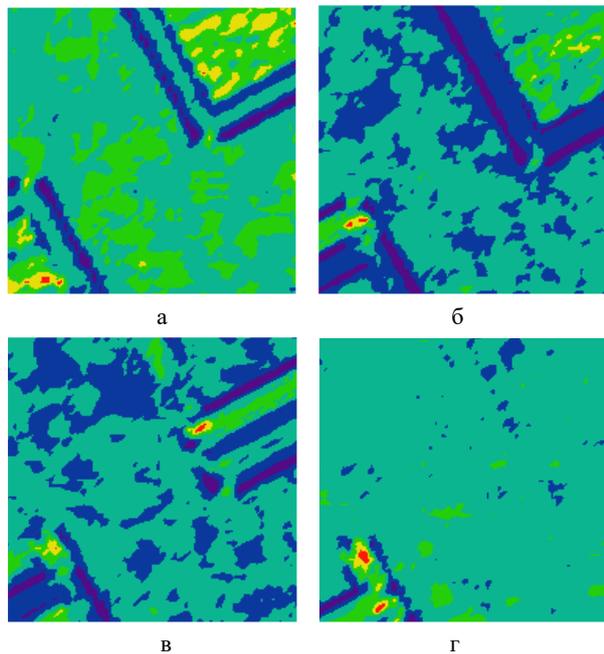


Рис. 3. Візуальне подання ПФР космічних знімків поля, засіяного кукурудзою, на якому проводилися польові роботи, станом на: 29.07.18 (а); 05.08.18 (б); 08.08.18 (в); 10.08.18 (г)

Як видно на рис. 3, візуальне подання ПФР дає змогу провести розподіл елементів знімків з різною структурою, тобто здійснити його сегментацію. Побудова і візуалізація ПФР дає змогу наочно дослідити зміну стану сільськогосподарських земель, які обумовлені проведенням польових робіт.

На візуальному поданні ПФР добре розрізняються межі ділянок поля на яких проводяться роботи. Крім того, можна визначити межі проведених робіт, що виконувалися не так давно, особливо це спостерігається на рис. 3, а, б.

На цих рисунках видно дві межі, одна – відокремлює ділянки поля з різним типом поверхні, а інша – ділянки з різним часом проведення польових робіт. Необхідно зазначити, що на вихідних космічних знімках візуально проявляється тільки межа з різним типом поверхні (див. рис. 2, в, г). На рис. 3, в, г видно, як розподіляються ділянки поля, на яких роботи ще не закінчені, тобто виявляються локальні аномалії поля.

Таким чином, розрахунок та візуальне подання ПФР космічних знімків сільськогосподарських земель дає змогу здійснювати їх сегментацію і визначити межі проведених польових робіт, але оцінити розміри аномальних ділянок в цьому випадку можна тільки якісно.

Використання «вікон» різного розміру під час аналізу космічних знімків на яких є аномальні ділянки дає змогу визначити їх розміри.

У табл. 1 наведено величини мінімальних, максимальних і середніх фрактальних розмірностей на космічних знімках поля, засіяного кукурудзою, при різних розмірах «вікна». Фрактальні розмірності космічних знімків були розраховані з використанням методу покриття. Необхідно нагадати, що на полі в кінці липня та на початку серпня проводилися польові роботи (рис. 1, в).

Як видно з даних табл. 1, у дати 29.07.18, 05.08.18, 08.08.18 і 10.08.18 спостерігаються аномальні значення середніх і мінімальних фрактальних розмірностей для всіх розмірів «вікон», а аномальні значення максимальних фрактальних розмірностей тільки для «вікон» великих розмірів – 32×32 і 48×48 пікселя.

Таблиця 1 – Величини мінімальних, максимальних і середніх значень фрактальних розмірностей космічних знімків поля, засіяного кукурудзою, при різних розмірах «вікна»

Дата	Розмір «вікна» у пікселях								
	4 × 4			8 × 8			16 × 16		
	D_{\min}	D_{\max}	$D_{\text{сер}}$	D_{\min}	D_{\max}	$D_{\text{сер}}$	D_{\min}	D_{\max}	$D_{\text{сер}}$
04.06.18	2,909	2,996	2,971	2,916	2,989	2,968	2,946	2,981	2,966
14.06.18	2,897	2,994	2,969	2,926	2,988	2,965	2,942	2,980	2,962
16.06.18	2,889	2,994	2,964	2,925	2,984	2,961	2,932	2,980	2,959
21.06.18	2,904	2,992	2,966	2,922	2,988	2,963	2,938	2,978	2,959
26.06.18	2,885	2,996	2,969	2,920	2,992	2,966	2,937	2,979	2,964
29.06.18	2,865	2,998	2,962	2,911	2,988	2,956	2,927	2,985	2,952
29.07.18	2,554	2,999	2,943	2,604	2,989	2,923	2,654	2,985	2,877
05.08.18	2,459	2,995	2,933	2,529	2,988	2,914	2,601	2,982	2,867
08.08.18	2,488	2,999	2,923	2,549	2,994	2,900	2,612	2,985	2,857
10.08.18	2,330	2,998	2,943	2,482	2,983	2,934	2,604	2,980	2,922
18.08.18	2,879	2,996	2,966	2,895	2,989	2,963	2,920	2,981	2,969
23.08.18	2,863	2,994	2,960	2,876	2,982	2,957	2,900	2,978	2,954
25.08.18	2,877	2,996	2,963	2,899	2,980	2,960	2,926	2,981	2,958

Закінчення табл. 1

Дата	Розмір «вікна» у пікселях								
	24 × 24			32 × 32			48 × 48		
	D_{\min}	D_{\max}	$D_{\text{сер}}$	D_{\min}	D_{\max}	$D_{\text{сер}}$	D_{\min}	D_{\max}	$D_{\text{сер}}$
04.06.18	2,952	2,979	2,961	2,955	2,965	2,961	2,963	2,965	2,964
14.06.18	2,945	2,978	2,958	2,948	2,966	2,956	2,957	2,960	2,959
16.06.18	2,941	2,977	2,957	2,945	2,964	2,956	2,954	2,958	2,957
21.06.18	2,947	2,971	2,958	2,951	2,970	2,958	2,956	2,961	2,957
26.06.18	2,944	2,971	2,963	2,948	2,971	2,963	2,952	2,965	2,959
29.06.18	2,933	2,964	2,948	2,938	2,960	2,947	2,943	2,948	2,947
29.07.18	2,679	2,979	2,813	2,706	2,862	2,779	2,779	2,818	2,796
05.08.18	2,634	2,976	2,794	2,675	2,873	2,759	2,756	2,807	2,788
08.08.18	2,643	2,980	2,802	2,679	2,945	2,765	2,723	2,766	2,745
10.08.18	2,642	2,979	2,908	2,663	2,963	2,878	2,678	2,815	2,717
18.08.18	2,937	2,974	2,960	2,949	2,971	2,960	2,953	2,961	2,957
23.08.18	2,926	2,969	2,955	2,933	2,969	2,954	2,939	2,958	2,947
25.08.18	2,932	2,971	2,957	2,938	2,967	2,957	2,944	2,962	2,953

Поява аномальних величин фрактальних розмірностей була обумовлена проведенням польових робіт на полі, що відобразилося на космічних знімках. Як зазначалося вище, на цих космічних знімках відображаються ділянки поля з різною структурою. Крім того, розміри (товщина) світлих ділянок для різних дат також різні і мають шарувату структуру. На рис. 2, г також видно, що у лівому нижньому куті космічного знімка знаходяться тільки дві світлі ділянки невеликого розміру (товщини і довжини).

З даних табл. 1 також видно, що при збільшенні розмірів «вікна» мінімальні фрактальні розмірності збільшуються, а середні фрактальні розмірності зменшуються (крім «вікна» розміром 48 × 48 пікселів для дат 29.07.2018 і 05.08.2018). Максимальні фрактальні розмірності при збільшенні розмірів «вікна» зменшуються, але аномальні значення проявляються тільки для «вікон» розміром 32 × 32 і 48 × 48 пікселів.

Розглянемо на скільки змінюються величини мінімальних, максимальних і середніх фрактальних розмірностей при збільшенні розмірів «вікна». На рис. 4 наведено графіки змін зазначених фрактальних розмірностей для чотирьох дат: 29.07.2018 (а), 05.08.2018 (б), 08.08.2018 (в) і 10.08.2018 (г).

На рис. 4 по осі абсцис відкладена різниця у розмірах «вікна», так $\Delta w = 8 = 8 \times 8 - 4 \times 4$, $\Delta w = 16 = 16 \times 16 - 8 \times 8$, $\Delta w = 24 = 24 \times 24 - 16 \times 16$ і т. д., а по осі ординат різниця мінімальних (штрихова лінія), максимальних (точкова лінія) і середніх (суцільна лінія) фрактальних розмірностей (ΔD_w) між сусідніми розмірами «вікна». Як видно на рис. 4, а, різниці мінімальних фрактальних розмірностей (штрихова лінія) починають зменшуватися при збільшенні розмірів «вікна» до 24 × 24 пікселя і збільшується до максимального значення при розмірі «вікна» 48 × 48 пікселів.

Різниці максимальних фрактальних розмірностей (точкова лінія) при невеликих розмірах «вікна»

не змінюються і мають екстремальне значення при розмірі «вікна» 32 × 32 пікселя. Різниці середніх фрактальних розмірностей (суцільна лінія) спочатку збільшуються до розмірів «вікна» 24 × 24 пікселя, а потім зменшуються. Такий же характер змін різниць мінімальних, максимальних і середніх фрактальних розмірностей спостерігається і на рис. 4, б для знімка станом на 05.08.2018.

Якщо проаналізувати структуру підстильної поверхні на цих космічних знімках (див. рис. 2, а, б), то можна побачити, що вона практично однакова. Розміри світлих ділянок складають приблизно від 16 до 24 пікселів, на цих розмірах «вікна» різниці мінімальних фрактальних розмірностей (штрихові лінії на рис. 4, а і б) починають зменшуватися. Розміри темних ділянок більші, і складають від 24 до 32 пікселів, при яких існує екстремум різниць максимальних фрактальних розмірностей (точкові лінії на рис. 4, а і б).

Поступове збільшення, а потім зменшення різниць середніх фрактальних розмірностей (суцільні лінії на рис. 4, а і б) характеризує наявність світлих і темних ділянок близьких розмірів – від 24 до 32 пікселів. Таким чином, за зміною різниць мінімальних фрактальних розмірностей можна оцінити розміри світлих ділянок на космічному знімку, а за зміною різниць максимальних фрактальних розмірностей – темних ділянок.

На рис. 2, в (для знімка станом на 08.08.2018) видно, що структура світлих і темних ділянок змінюється, товщина, але не довжина, світлих ділянок зменшується і вони стають шаруваті, а більша частина знімка має темну градацію сірого. При цьому змінюється поведінка різниць середніх і максимальних фрактальних розмірностей (суцільна і точкова лінії на рис. 4, в), а характер змін різниць мінімальних фрактальних розмірностей (штрихова лінія на рис. 4, в) залишається практично таким, як і на рис. 4, а і б. З цього можна зробити висновок, що

довжина світлих ділянок залишається практично не змінною – від 16 до 24 пікселів, а розміри темних ділянок збільшуються до 48 пікселів.

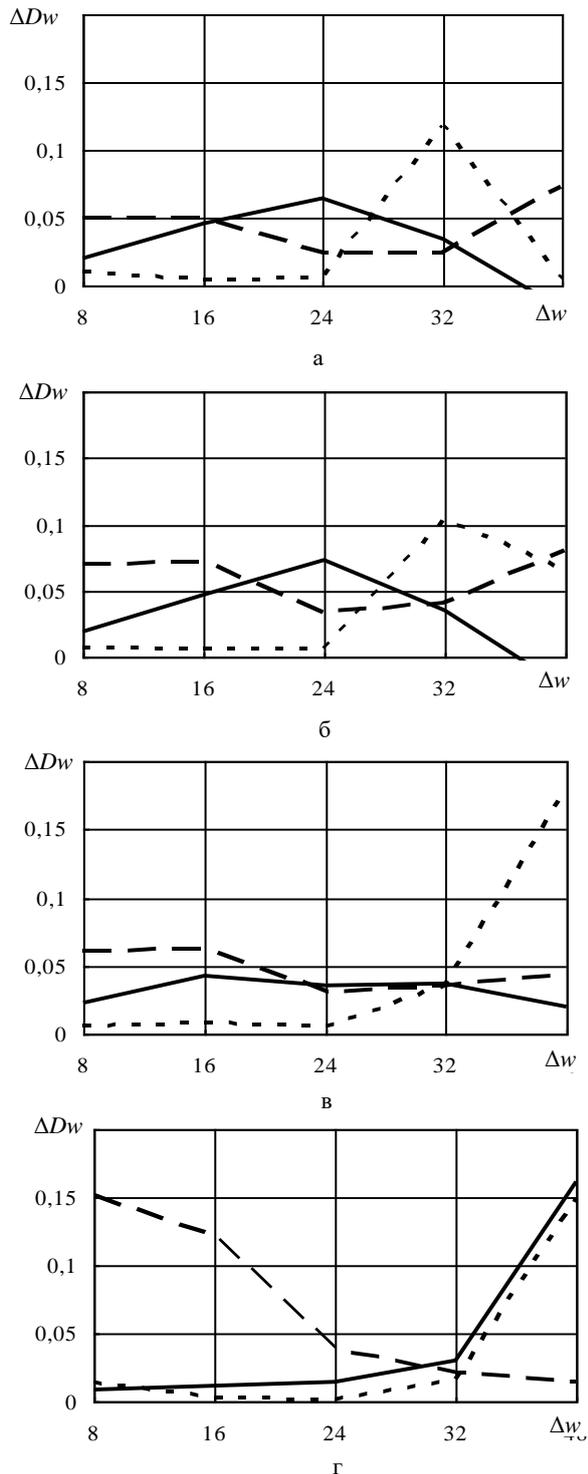


Рис. 4. Залежність різниць мінімальних, максимальних і середніх фрактальних розмірностей від розмірів «вікна»: 29.07.2018 (а), 05.08.2018 (б), 08.08.2018 (в) і 10.08.2018 (г)

На рис. 4, в (точкова лінія) при таких розмірах «вікна» спостерігається екстремум різниць максимальних фрактальних розмірностей. Хвиловий характер зміни різниць середніх фрактальних розмірностей (суцільна лінія на рис. 4, в) може характери-

зувати наявність шаруватої структури на космічному знімку.

Зовсім інша структура підстільної поверхні спостерігається на рис. 2, г, на якому видно, що світлі ділянки зменшують не тільки за товщиною, а і за довжиною, і розміщуються тільки в одному місці космічного знімка – у лівому нижньому куті. На рис. 4, г видно, що зміна розмірів світлих і темних ділянок підстільної поверхні на космічному знімку приводить до зміни всіх різниць фрактальних розмірностей. Різниці мінімальних фрактальних розмірностей (штрихова лінія) мають екстремум при розмірах «вікна» 8×8 пікселів і велике значення при розмірі «вікна» 16×16 пікселів. Така поведінка різниць мінімальних фрактальних розмірностей обумовлена зменшенням довжини світлих ділянок на знімку до 16 пікселів. Характер змін різниць максимальних (точкова лінія) і середніх (суцільна лінія) фрактальних розмірностей практично однаковий. Спочатку зазначені різниці практично не змінюються, а потім при розмірах «вікна» 32×32 пікселя починають збільшуватися і мають екстремальні значення при розмірі «вікна» 48×48 пікселів. Такі значення розмірів «вікна» відповідають розміру темної ділянки на космічному знімку (див. рис. 2, г).

Таким чином, використання під час фрактального аналізу «вікон» різного розміру дає змогу визначити розміри різних аномальних структур на космічному знімку за рахунок зміни різниць мінімальних, максимальних і середніх фрактальних розмірностей.

Висновки

У теперішній час сільськогосподарські роботи виконуються з високою динамікою і оцінка їх результатів потребує постійного моніторингу. Для отримання інформації про стан і структуру земельних ділянок та посівних площ і виявлення ділянок землі, що мають ерозійні порушення, а також інші види деградації землі широко застосовуються дані ДЗЗ. Методи фрактального аналізу зображень все частіше застосовують для підвищення інформативності космічних знімків під час моніторингу земної поверхні. Під час застосування таких методів будуються поля фрактальних розмірностей і у подальшому проводиться їх оброблення і дослідження. При цьому використовуються космічні знімки в одному діапазоні хвиль.

Розглянута можливість застосування фрактального аналізу для визначення розмірів ділянок поля на яких проводяться сільськогосподарські роботи з використанням «вікон» різних розмірів. Поступове збільшення, а потім зменшення різниць середніх фрактальних розмірностей під час збільшенні розмірів «вікна» характеризує наявність світлих і темних ділянок на космічному знімку, що обумовлені проведенням сільськогосподарських робіт. За зміною різниць мінімальних фрактальних розмірностей можна оцінити розміри світлих ділянок на космічному знімку, а за зміною різниць максимальних фрактальних розмірностей – темних ділянок.

Під час подальших досліджень, доцільно здійснити оцінку впливу величини стрибка, що бере уч-

асть у побудові поля фрактальних розмірностей, на величини мінімальних, максимальних і середніх значень фрактальних розмірностей.

іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в даній статті.

Конфлікт інтересів

Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів стосовно даного дослідження, в тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи

Використання засобів штучного інтелекту

Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Lilian Yang, Bing Lu, Margaret Schmidt et al. Applications of remote sensing for crop residue cover mapping. Smart Agricultural Technology. 2025. Vol. 11. P. 1 – 14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.100880>.
2. Тараріко О.Г., Сиротенко О.В., Ільєнко Т.В., Кучма Т.Л. Агроєкологічний супутниковий моніторинг. К.: Аграр. наука, 2019. 204 с. URL: <https://agroeco.org.ua/vydannya/agroekologichnij-suputnikovij-monitoring/>
3. ESA Sentinel Online, Spatial Resolution. ESA Sentinel Online URL: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/resolutions/spatial> .
4. Feder J. Fractals. New York: Springer US, 1988. 263 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-2124-6>.
5. Іванов В.К., Кучук Г.А., Пашенко Р.Е. Фрактальний аналіз процесів, структур і сигналів / Під. ред. Р.Е. Пашенко. Х.: Екоперспектива, 2006. 348 с. URL: <https://nvd-nanu.org.ua/ae7f7065-2b48-46b5-bce8-45b8cd753cdd/>
6. Марюшко М.В., Пашенко Р.Е. Фрактальний аналіз космічних знімків SENTINEL-2 для моніторингу сільськогосподарських культур. РЕІКС. 2020. №4(96). С. 34 – 47. DOI: <https://doi.org/10.32620/reks.2020.4.03>.
7. Пашенко Р.Е., Марюшко М.В. Оцінка стану різних сільськогосподарських культур з використанням фрактального аналізу. Сучасні інформаційні системи. 2023. Том. 7, № 3. С. 81 – 88. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2023.3.12>.
8. Пашенко 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. Марюшко М.В., Пашенко Р.Е., Коблюк Н.С. Моніторинг сільськогосподарських культур із застосуванням космічних знімків SENTINEL-2. Радіоелектронні і комп'ютерні системи. 2019. №1(89). С. 99 – 108. DOI: <https://doi.org/10.32620/reks.2019.1.11>.
10. Crownover R.M. An Introduction to Fractals and Chaos. London: Jones and Bartlett Publishers, Inc, 1995. 352 p. URL: <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA210257.pdf>

Received (Надійшла) 18.10.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 14.01.2026

Publication date (Дата публікації) 27.02.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ/ ABOUT THE AUTHORS

Пашенко 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>.

Марюшко Максим В'ячеславович – асистент кафедри геоінформаційних технологій та космічного моніторингу Землі, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна,

Maksim Mariushko – Teaching Assistant of Dept. of Geo-information Technologies and Space Monitoring of the Earth, National Aerospace University «Kharkov Aviation Institute», Kharkov, Ukraine,

e-mail: max.maryushko@gmail.com; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0003-3743-8535>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57203139152&origin=resultlist>.

Estimation anomalies sizes on spaces pictures of agricultural earths with the use fractals dimensions

Ruslan Pashchenko, Maxim Mariushko

Abstract. In the present terms agricultural works are executed with a high dynamics and estimation their results needs permanent monitoring. The **subject** of the study in the article is estimation possibility determination of sizes anomalous areas of the field on spaces pictures with the use fractals dimensions that settle accounts in the different sizes of «windows». The **object** of the study are agricultural earths on which works were conducted and which are fixed on the spaces pictures of satellite Sentinel-2. The **goal** is estimation influencing «window» extents on the sizes of fractals dimensions spaces pictures of agricultural earths during their monitoring and determination sizes of anomalous areas. **The following results were obtained.** It is investigational influencing «window» extents, which takes part in construction the field of fractals dimensions, on the sizes minimum, maximal and mean values of fractals dimensions, which are on the spaces pictures agricultural earths which works behaved on. Gradual increase, and then diminishing differences middle fractals dimensions under time jumboizing «window» characterizes the presence light and dark areas on a space picture, that is conditioned by the leadthrough of agricultural works. After the change differences minimum fractals dimensions can be estimated sizes of light areas on a space picture, and after the change differences maximal fractals dimensions – dark areas. **Conclusions.** The use during the fractal analysis «windows» of different size allows to determine sizes different anomalous structures on a space picture due to the change differences minimum, maximal and middle fractals dimensions.

Keywords: monitoring the state of agricultural earths, space pictures, fractal dimension, anomalous area.