

УДК 528.72:633/635

doi: 10.32620/reks.2020.4.03

М. В. МАРЮШКО<sup>1</sup>, Р. Е. ПАЩЕНКО<sup>2</sup><sup>1</sup> Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», Україна<sup>2</sup> Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України, Україна

## ФРАКТАЛЬНИЙ АНАЛІЗ КОСМІЧНИХ ЗНІМКІВ SENTINEL-2 ДЛЯ МОНІТОРИНГУ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР

**Предметом** вивчення в статті є застосування нових підходів до обробки просторової інформації з супутників для більш ефективної та оперативної оцінки стану сільськогосподарських культур, що обумовлено зростаючою тенденцією доступності до даних дистанційного зондування Землі, які завдяки поліпшенню просторового та часового дозволу можуть застосовуватися в завданнях аналізу стану рослинних покривів та інших пов'язаних з цим робіт. **Метою** статті є оцінка можливості обробки космічних знімків супутника Sentinel-2 з використанням фрактальних розмірностей (ФР) для моніторингу сільськогосподарських культур на різних фазах вегетації. **Завдання:** дослідження методу побудови фрактальних розмірностей для космічних знімків із супутника Sentinel-2 для оцінки стану сільськогосподарських культур на протязі всієї фази вегетації, оцінка зв'язку між зміною середніх значень ФР та зміни індексу NDVI на різночасових космічних знімках, визначення переваги у застосуванні методу розрахунку фрактальних розмірностей у порівнянні з індексом NDVI. **Отримані наступні результати.** Було встановлено, що найчастіше для визначення кількісного стану біомаси застосовується індекс NDVI у різні часові інтервали. Але даний індекс стає не ефективним в періоди послаблення активної фази вегетації. У зв'язку з цим представляється практичний інтерес для оцінки можливості застосування фрактального аналізу космічних знімків сільськогосподарських культур на різних фазах вегетації. Основою фрактального аналізу цифрових зображень є побудова поліів фрактальних розмірностей. Проведено аналіз змін величин ФР на різночасових космічних зображеннях поля з кукурудзою на зерно від величини «ковзаючого вікна». Досліджені залежності максимальних і мінімальних значень ФР, що є на зображеннях, від величини «вікна». Показано, що за величиною змін максимальних значень ФР із збільшенням розмірів «вікна» можна оцінити однорідність підстильної поверхні. Встановлено, що характер зміни мінімальних значень ФР при зміні розмірів «вікна» обумовлений великою порізаністю підстильної поверхні на знімках, а аномальна поведінка цих значень дозволяє визначати аномальні області різних розмірів на космічних знімках. Також досліджено характер зміни діапазону ФР із збільшенням розмірів «вікна», що може бути використано для визначення однорідності підстильної поверхні на космічних знімках, а також під час виявлення на них аномальних ділянок. Проведено аналіз змін середніх значень ФР із збільшенням розмірів «ковзаючого вікна». Показано, що при однакових розмірах «вікна» для різночасових знімків середні ФР будуть відрізнятися, що може бути використано для характеристики фази вегетації рослинності. Встановлено, що характер змін середніх значень ФР такий же, як і індексів NDVI для різночасових космічних знімків поля з посівами кукурудзи, а також що величини середніх значень ФР залежать від розмірів «вікна». Запропоновано розмір «вікна», який забезпечує компроміс між швидкістю обробки зображення та якістю оцінки стану вегетації посівів. Показано, що для підвищення швидкості побудови поля фрактальних розмірностей (ПФР) під час обробки зображень великих розмірів доцільно замість «ковзаючого вікна» застосовувати «стрибаюче вікно». Зазначено, що величина «стрибка» може дорівнювати розміру «вікна». Така величина «стрибка» забезпечує максимальну швидкодію та не впливає на якість обробки космічних знімків посівів. **Висновки.** Запропонований підхід до обробки просторових даних із супутників дозволяє проводити оцінку стану сільськогосподарських культур з використанням ФР. Характер зміни середніх значень ФР ідентичний до зміни індексу NDVI на різночасових космічних знімках посівів кукурудзи. При цьому під час побудови ПФР можуть використовуватися дані тільки з одного каналу супутника Sentinel-2 (наприклад, з ближнього інфрачервоного каналу – b8), а для розрахунку індексу NDVI необхідно отримувати дані з двох каналів (з ближнього інфрачервоного та червоного каналів – канали b8 і b4 супутника Sentinel-2 відповідно), що дозволить зменшити час на обробку. Шкала середніх значень ФР дозволяє виявити якісну зміну біомаси. Під час подальших досліджень, доцільно здійснити фрактальний аналіз космічних знімків Sentinel-2 для інших сільськогосподарських культур на різних фазах вегетації.

**Ключові слова:** космічні знімки Sentinel-2; моніторинг сільськогосподарських культур; індекс NDVI; фрактальний аналіз; фрактальна розмірність.

## Вступ

Як свідчить світовий досвід, дані дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) все частіше використовують для рішення різноманітних завдань під час проведення сільськогосподарських робіт [1]. Зокрема основними з них є: картографування рослин; моніторинг сільськогосподарських культур; прогнозування урожайності тощо [2]. Широке застосування даних ДЗЗ обумовлено перш за все оперативністю та наочністю під час обробки даних, що отримуються з великих територій, та в умовах швидкої зміни вегетаційного стану сільськогосподарських культур. Сучасні супутники ДЗЗ (Terra, Aqua, Landsat 8, Sentinel-2) дозволяють отримувати космічні знімки територій, що досліджуються, з періодичністю від 1 до 8 діб та з просторовим розрізненням від 250 до 10 метрів [3]. Також сучасні методи обробки даних ДЗЗ дозволяють створювати наочні картографічні матеріали, що сприяє ефективному веденню агрови-робництва [4].

Космічні знімки з зазначених супутників ДЗЗ можуть бути отримані агровиробниками безкоштовно на спеціалізованих сервісах. Однією з програм, що надає доступ до такого роду даних є програма Європейського космічного агентства Copernicus, яка дозволяє отримати дані з супутників Sentinel-2 (запуск першого супутника Sentinel-2A здійснено 22.06.15, другого Sentinel-2B – 07.03.2017) [5]. У 2016 році здійснювалося тестування системи, а з 2017 року проект перейшов в операційну експлуатацію. Космічні знімки з супутників Sentinel-2 мають високу просторову роздільну здатність (10 – 20 метрів), що дає дослідникам та користувачам задовільні початкові дані для вирішення завдань аналізу земельних покривів, класифікації сільськогосподарських культур та інших пов'язаних з цим робіт [6]. Але для розробки практичних додатків з використанням таких знімків необхідне знання особливостей отримання та характеристик космічних знімків Sentinel-2, а також різноманітних методів їх обробки для оцінки стану сільськогосподарських культур.

У теперішній час існує велика кількість методів моніторингу та прогнозування врожайності. Коротка характеристика методів, що ґрунтуються на оцінках фізичних особливостей навколишнього середовища (статистичний метод і метод механістичних моделей росту рослин), методу прямого оцінювання вмісту хлорофілу (наземні вимірювання цієї величини SPAD-датчиками) та методів, що використовують дані ДЗЗ (методи, що використовують регресійні моделі та вегетаційні індекси і методи, які базуються на оцінці стану рослинності, таких як LAI і біомаси) наведена у [7]. Також у [7] зазначені основні недоліки цих методів, так статистичні методи мають велику

трудомісткість наземних вимірювань і складність виявлення залежностей, а більшість механістичних моделей вимагають великої кількості вхідних даних, які необхідно подавати на її вхід, а також такі моделі, як правило, застосовують тільки для одного виду рослин. Застосування методу прямого оцінювання вмісту хлорофілу обмежена необхідністю проведення великої кількості наземних вимірювань. Під час застосування методів, які використовують дані ДЗЗ, виникають проблеми з необхідністю вибору типу функції під час створення регресійних моделей та вибору типу вегетаційного індексу, яких існує велика кількість, наприклад, PVI, SAVI, TSAVI, ARVI, GNDVI, PRI, NDVI та SR [8]. Також зазначимо, що для розрахунку вегетаційних індексів необхідні данні двох і більше спектральних діапазонів (багатоспектральні знімки). Крім того, розрахунки індексу LAI і біомаси (оцінка стану рослинності) є трудомісткими.

Наявність великої кількості методів прогнозування врожайності, а також відсутність загальних підходів до оцінки стану посівів за даними ДЗЗ показує, що задача моніторингу стану сільськогосподарських культур є актуальною і до кінця не вирішеною.

Перспективним напрямком підвищення інформативності космічних знімків є застосування методів фрактального аналізу зображень [9]. Складність форм підстильної поверхні та рослинності може бути описана за допомогою фрактальної розмірності. Характерні величини фрактальної розмірності дозволяють здійснювати дешифрування космічних зображень. У роботі [10] розглянуті питання обробки радіолокаційних космічних знімків сільськогосподарських полів. На основі даних дистанційного зондування та використання фрактальної розмірності показана можливість розподілу різних типів ґрунтів. Але в роботі не розглядаються питання моніторингу сільськогосподарських культур на різних фазах вегетації.

*Метою статті є оцінка можливості обробки космічних знімків супутника Sentinel-2 з використанням фрактальних розмірностей для моніторингу сільськогосподарських культур на різних фазах вегетації.*

### Коротка характеристика отримання космічних знімків Sentinel-2 та визначення індексу NDVI

Моніторинг сільськогосподарських культур на великих територіях вимагає багато часу та великих людських трудовитрат. Для усунення цих проблем та здійснення ефективного моніторингу стану посівів на великих територіях доцільно використовувати космічні знімки супутника Sentinel-2. В мережі Інтернет [11, 12] у вільному доступі існує актуальна та постійно поновлювальна (1-2 рази на тиждень на задану

територію) база космічних знімків, які мають високу просторову розподільну здатність (в одному пікселі 10-60 м). Супутники Sentinel-2 дозволяють отримувати широкосмугові мультиспектральні зображення у 13 спектральних діапазонах [13]:

– канали b2, b3, b4 – видимий діапазон (ВД), канал b8 – широка смуга ближнього інфрачервоного діапазону (ІЧД), з просторовим розрізненням 10 м;

– канали b5, b6, b7, b8a – вузькі смуги в ближньому ІЧД, канали b11, b12 – широкі смуги в короткохвильовому ІЧД, з просторовим розрізненням 20 м;

– канали b1, b9, b10 – вузькі смуги в ВД, ближньому і короткохвильовому ІЧД, з просторовим розрізненням 60 м.

Необхідно зазначити, що два діючих на сьогоднішній час супутників Sentinel-2 здійснюють повторне спостереження однієї й тієї ж території тільки через п'ять днів, а через накладання зон між суміжними орбітами, частота спостережень за деякими територіями може збільшуватися. При цьому знімки є доступними у вигляді збірки елементарних «гранул (granules)» рівня 1С і дуже рідко на рівні 2А. Правила формування завантажених файлів з космічними знімками рівнів 1С та 2А наведені у [14].

Таким чином, користувачі можуть отримувати космічні знімки Sentinel-2 у мережі Інтернет на рівні 1С у 13 спектральних діапазонах. При цьому на задану територію можна отримати 5-6 космічних знімків на місяць. Така періодичність і просторове розрізнення знімків можуть забезпечити вихідні данні для моніторингу сільськогосподарських культур.

На сьогоднішній день у різних країнах найбільш часто для моніторингу стану посівів на базі космічних знімків використовують нормалізований різницевий вегетаційний індекс – NDVI [8]. Застосування такого кількісного показника дозволяє визначити ділянки на яких існують відхилення в рості і розвитку рослин.

Нормалізований різницевий вегетаційний індекс (NDVI) розраховується за виразом:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}, \quad (1)$$

де NIR – відбивальна інфрачервона область спектру (760-900 нм), що відповідає каналу b8 (832 нм) для супутника Sentinel-2,

RED – видима червона область спектру (630-690 нм), що відповідає каналу b4 (665 нм) для супутника Sentinel-2.

В роботі [15] приведені результати досліджень змін індексу NDVI різночасових космічних знімків сільськогосподарських земель Вільхуватської сільсь-

кої ради Чутівського району Полтавської області, переважну частину яких обробляє приватне сільськогосподарське підприємство «Дружба».

Під час кількісної оцінки стану вегетації сільськогосподарських культур спочатку було вибрано конкретне поле з відомим типом культури – кукурудза на зерно. Потім були отримані з мережі Інтернет три космічні знімки супутника Sentinel-2 на різних фазах вегетації – 16 червня, 09 липня і 29 липня 2018 року, з яких було «вирізано» зображення поля з кукурудзою. Далі для кожного з трьох знімків (для кожного пікселя зображення) були розраховані індекси NDVI за формулою (1). Наступним кроком була побудова гістограм розподілу вегетаційних індексів. За допомогою гістограм були визначені середні значення індексу NDVI для поля та їх розкид ( $\Delta$ ), які склали:

$$NDVI_{16.06} = 0,6876, \quad \Delta_{16.06} = 0,0193;$$

$$NDVI_{09.07} = 0,7700, \quad \Delta_{09.07} = 0,0109;$$

$$NDVI_{29.07} = 0,6622, \quad \Delta_{29.07} = 0,0106.$$

З аналізу середніх значень індексу NDVI видно, що стан біомаси змінюється з часом, та має екстремум (максимальне значення) – 09.07.2018, а розкид є більшим на початковому етапі вегетації – 16.06.2018. За даними аналізу, оцінена ступень дозрівання кукурудзи, яка характеризується зменшенням середнього значення індексу NDVI. Також зроблено висновок, що аналіз гістограм значень вегетаційного індексу в межах одного поля (кукурудза на зерно) дозволяє виявити кількісну та оцінити якісну зміну біомаси, що вказує на зміну фази вегетації.

Але у зв'язку з тим, що індекс NDVI у значній мірі залежить від кількості активної біомаси, то він стає неефективним в періоди, коли рослинність є послабленою або спостерігається низький рівень вегетації. У зв'язку з цим представляє практичний інтерес провести аналіз величин фрактальних розмірностей космічних знімків сільськогосподарських культур на різних фазах вегетації, а також дослідити зв'язок фрактальних розмірностей з індексом NDVI.

### Фрактальний аналіз космічних знімків Sentinel-2 для моніторингу сільськогосподарських культур

Фрактальний аналіз стану сільськогосподарських культур будемо проводити на базі космічних знімків супутника Sentinel-2 для одного спектрального діапазону – канал b8, який формує зображення в широкій смузі ближнього інфрачервоного діапазону. Це пов'язано з тим, що в цьому діапазоні фіксуються

дані, що формуються за рахунок відбиття сонячного випромінювання хлорофілом рослин.

На рис. 1 показаний космічний знімок каналу b8 супутника Sentinel-2 на якому показані землі Вільхуватської сільської ради Чутівського району Полтавської області, що отриманий з мережі Інтернет [11].

Візуальний аналіз космічного знімку, наведеного на рис. 1, дозволяє здійснити розподіл земель сільськогосподарського призначення та елементи природного ландшафту (річки, яри та ін.), а також антропогенні об'єкти (дороги, будинки та ін.). Але визначити стан вегетації сільськогосподарських культур візуально неможливо. Також виникають труднощі одночасного аналізу великої кількості сільськогосподарських ділянок, на яких ростуть різноманітні культури – від озимої пшениці до соняшнику та кукурудзи.



Рис. 1. Землі Вільхуватської сільської ради станом на 16.06.2018 в ближньому інфрачервоному діапазоні (канал b8)

Для рішення задачі оцінки стану посівів в роботі [15] використовувалося одне поле, обробкою якого займається ПСП «Дружба» (виділено білим колом на рис. 1), для якого розраховувався індекс NDVI, який порівнювався з контактною інформацією про вирощувану культуру (кукурудзу на зерно) на конкретній ділянці у різні часові інтервали.

Проведемо обробку космічних знімків зазначеного поля з використанням фрактальної розмірності на різних фазах вегетації (різночасових знімках). Спочатку здійснимо попереднє «вирізання» прямокутної ділянки поля з кукурудзою з вихідних зображень розмірами приблизно 220×230 пікселів. На рис. 2, а-в наведено елементи космічних знімків (канал b8, ближній інфрачервоний діапазон) з полем засіяним кукурудзою на зерно станом: на 16 червня (а), 09 липня (б) і 29 липня (в) 2018 року.

Під час моніторингу сільськогосподарських культур з використанням каналу b8 супутника Sentinel-2 носієм інформації про стан рослинності на

зображенні є світлові хвилі в ІЧД, що формуються за рахунок відбиття сонячного випромінювання у залежності від характеристик підстильної поверхні. Світлова хвиля переносить інформацію про об'єкт завдяки тому, що різні параметри світлової хвилі модулюються відповідно до властивостей точок підстильної поверхні.

Як видно на рис. 2, космічні зображення аналізованого поля на різних фазах вегетації візуально практично не відрізняються. На цих зображеннях можна оцінити лише загальний стан культури та ділянки на яких були аномальні впливи (град, буревій та ін.). Невелика зміна градацій сірого кольору (від світло-сірого до темно-сірого) дозволяє лише зробити висновок, що за час спостереження пройшли якісні зміни досліджуваної культури. Але оцінити стан кукурудзи на полі неможливо.

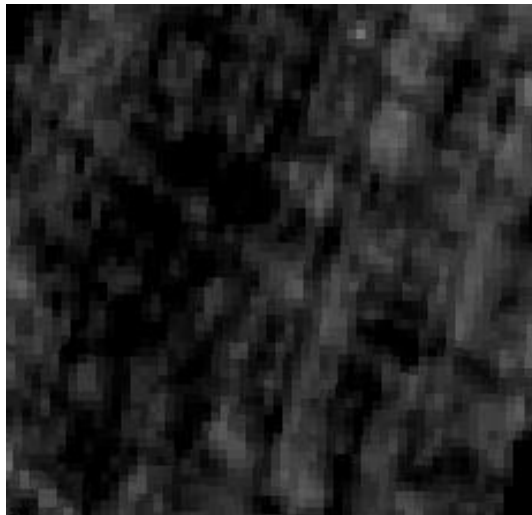
Таким чином, візуальний аналіз космічного знімку каналу b8 супутника Sentinel-2 дозволяє лише оцінити відсутність аномальних явищ на полях сільськогосподарських культур, тому проведемо кількісну оцінку вегетаційних характеристик поля, що досліджується, з використанням фрактальної розмірності.

Зображення показані на рис. 2 представлені у градаціях сірого формату \*.bmp і мають розміри  $x \times y$  пікселів ( $x \approx 220$ ,  $y \approx 230$ ) при цьому операції поліпшення якості зображення не проводилися. Такі цифрові зображення можна представити у тривимірному вигляді розподілу інтенсивності світлової хвилі в ІЧД  $I(x, y)$ , як показано на рис. 3 для космічного знімку за 16 червня 2018 року.

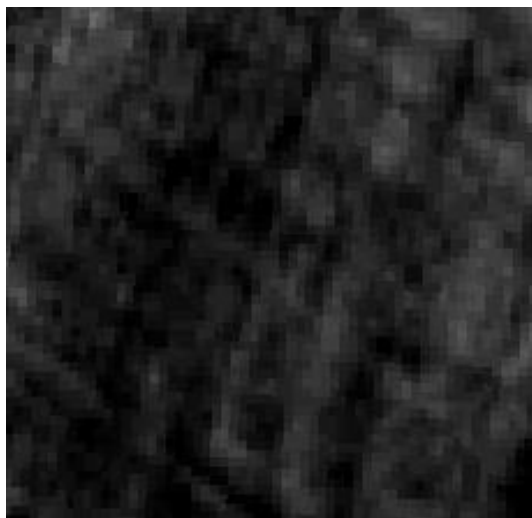
Як видно з рис. 3, розподіл інтенсивності світлової хвилі в ІЧД представляє складну геометричну структуру, характеристики якої доцільно досліджувати з використанням ФР, яка є одним з основних понять теорії фракталів.

Первинне визначення фракталу було дано Б. Мандельбротом через поняття розмірності Хаусдорфа-Безіковича у роботі [16]: «фрактал – множина, розмірність Хаусдорфа-Безіковича, якої строго більше за її топологічну розмірність» ( $D > D_T$ ). Фрактальна розмірність є дробовою величиною і показує складність (порізаність) форми, яка заповнює простір. Існує багато методів розрахунку розмірності, але всі вони включають підрахунок об'єму або площі фрактальної форми і того, як вона змінюється в різних масштабах. Залежно від цього існують різні типи фрактальної розмірності. Найбільш поширеною фрактальною розмірністю є розмірність Хаусдорфа-Безіковича [16]:

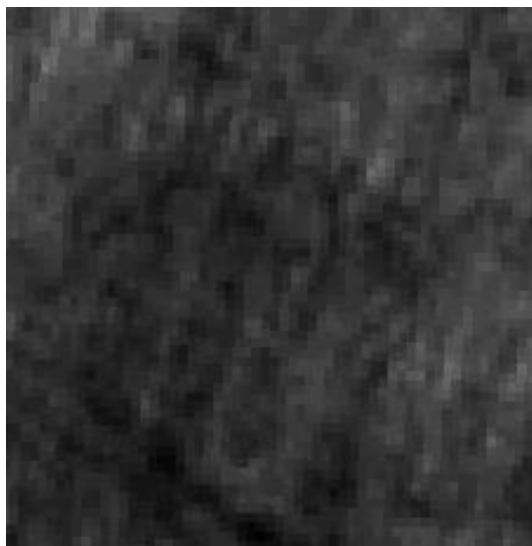
$$D = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log N(\varepsilon)}{\log(1/\varepsilon)} \quad (2)$$



а



б



в

Рис. 2. Елементи космічних знімків (канал b8) з полем засіяним кукурудзою на зерно станом на: 16.06.2018 (а); 09.07.2018 (б); 29.07.2018 (в)

Безпосередньо за цією формулою розрахувати ФР зображення підстильної поверхні неможливо. Фрактальна розмірність сильно залежить від того, як її визначати, тобто окрім формули для розрахунку необхідно точно задати спосіб її визначення. Особливості способу, що застосовується, можуть утворювати різні значення фрактальної розмірності. На практиці найчастіше для аналізу цифрових зображень з використанням фрактальної розмірності застосовують метод покриття. Стисло розглянемо порядок розрахунку ФР даним методом [17].

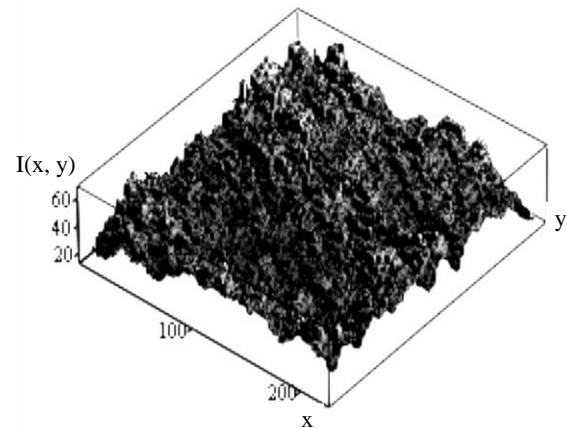


Рис. 3. Тривимірне представлення космічного знімка (канал b8) поля станом на 16.06.2018

На першому етапі реалізації даного методу вибирається деякий куб з стороною довжиною  $\epsilon$  і цим кубом покривається тривимірне представлення зображення (множина  $I$ ). На другому етапі підраховується скільки кубів з стороною  $\epsilon$  накривають всю множину  $I$  (зображення)  $N(\epsilon)$  [18, 19].

Нехай  $N(\epsilon)$  мінімальна кількість кубів із стороною  $\epsilon$  необхідних для покриття множини  $I$ . Тоді міра  $\mu_D(I)$  приблизно дорівнює:

$$\mu_D(I) \approx N(\epsilon) \cdot \epsilon^D. \quad (3)$$

Вважаючи, що міра  $\mu_D(I) > 0$ , для деякої константи  $C > 0$  перетворюємо (3) до виду:

$$N(\epsilon) \approx \frac{C}{\epsilon^D}. \quad (4)$$

Логарифмуючи праву і ліву частину (4), одержимо:

$$\log N(\epsilon) = \log C - D \cdot \log \epsilon, \quad (5)$$

тобто

$$D = -\frac{\log N(\varepsilon)}{\log \varepsilon} + \frac{\log C}{\log \varepsilon}. \quad (6)$$

Оскільки  $\log \varepsilon \rightarrow -\infty$  при  $\varepsilon \rightarrow 0$ , то вираз для визначення розмірності  $D$  має вигляд формули (2).

Для визначення невідомих параметрів  $C$  і  $D$  далі проводяться обчислення  $N(\varepsilon)$  для декількох інших величин  $\varepsilon$  (наприклад, друга величина може дорівнювати  $\varepsilon_2 = \varepsilon_1/2$ , третя –  $\varepsilon_3 = \varepsilon_1/4$ , а четверта –  $\varepsilon_4 = \varepsilon_1/8$ ). В результаті визначаються чотири значення  $N(\varepsilon_1), N(\varepsilon_2), N(\varepsilon_3), N(\varepsilon_4)$ .

Потім будується графік логарифмічної залежності  $\log N(\varepsilon)$  від  $\log 1/\varepsilon$  (рис. 4). Число значень (точок) кривої залежить від структури (форми) вихідних аналізованих даних.

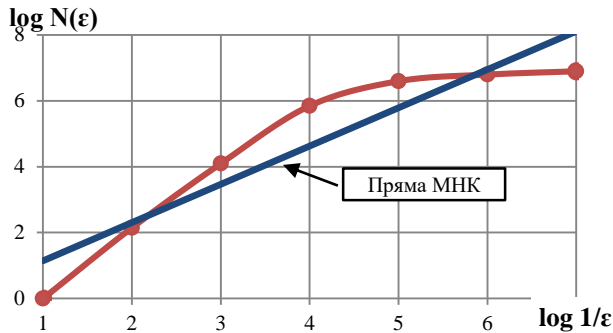


Рис. 4. Визначення фрактальної розмірності

За одержаними даними будується лінійна апроксимація одержаної залежності  $\log N(\varepsilon)$  від  $\log 1/\varepsilon$ . Для апроксимації (пошуку значень  $\log C$  і  $D$ ) найчастіше використовується метод найменших квадратів (МНК) (рис. 4). Якщо розглядають пряму, що проходить через початок координат, то величину  $\log C$  не використовують.

На завершальному етапі фрактальна розмірність  $D$  визначається як тангенс кута нахилу апроксимованої прямої.

Використання апроксимації методом МНК дозволяє автоматизувати процес аналізу кутів нахилу (визначення ФР) для різних вхідних даних.

На рис. 5 наведений приклад тривимірного представлення гіпотетичного зображення з різною фрактальною розмірністю.

Як видно на рис. 5, чим складніше форма зображення, яка заповнює тривимірний простір, тим більше величина фрактальної розмірності. Тобто чим більше заповнюється і порізаний стає простір, тим більше стає ФР. Якщо простір заповнений повністю (правий рисунок), то ФР дорівнює  $D = 3,0$ . Ціла величина розмірності (топологічна розмірність) характерна для тривимірних геометричних фігур (куб, паралелепіпед тощо).

Основою фрактального аналізу великих і складних цифрових зображень є побудова поля фрактальних розмірностей (ПФР). Процес побудови ПФР детально розглянутий у [9]. Під час побудови ПФР проводиться сканування зображення  $I(x, y)$  «вікном»  $W$ , розміром  $n \times m$  пікселів, з кроком переміщення  $s$  (при  $s = 1$  «вікно» є таким, що «ковзає», а при  $s > 1$  – що «скаче»). На кожному кроці (для кожного положення «вікна») визначається чисельне значення ФР  $D_{i,j}$  у «вікні»  $W$  і записується в матрицю  $D$ , яка називається «полем фрактальних розмірностей».

Під час подальшого фрактального аналізу космічних зображень з полем засіяним кукурудзою на зерно будемо будувати ПФР, в якому фрактальні розмірності розраховуються методом покриття при апроксимації точок методом МНК.

При побудові ПФР можна використовувати «вікна» різного розміру від  $2 \times 2$  пікселя до  $x \times y$  пікселів, де  $x$  і  $y$  – розміри зображення, що аналізується. Проведемо аналіз змін величин ФР на космічних зображеннях кукурудзяного поля від величини «ковзаючого вікна».

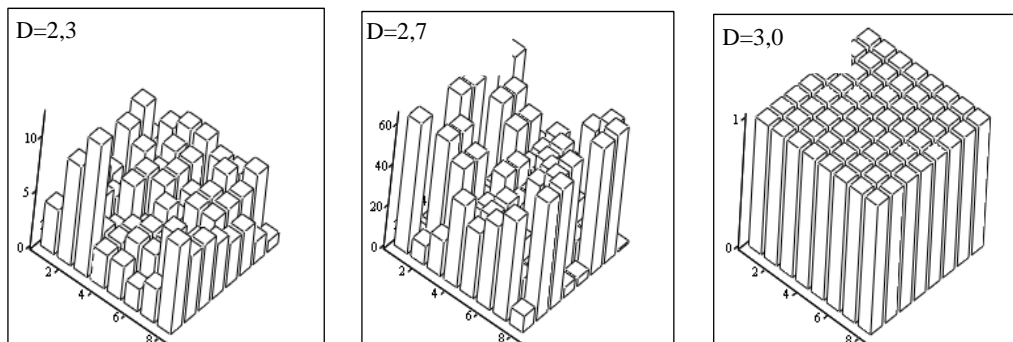


Рис. 5. Приклад тривимірного представлення зображення з різною фрактальною розмірністю

На рис. 6, а, б показані залежності максимальних ( $D_{\max}$ ) і мінімальних ( $D_{\min}$ ) значень ФР, що є на зображеннях, від величини «ковзаючого вікна». На рисунках залежності для космічного знімка станом на 16.06.2018 показані суцільною лінією, станом на 09.07.2018 – штриховою лінією, а станом на 29.07.2018 – штрих-пунктирною лінією.

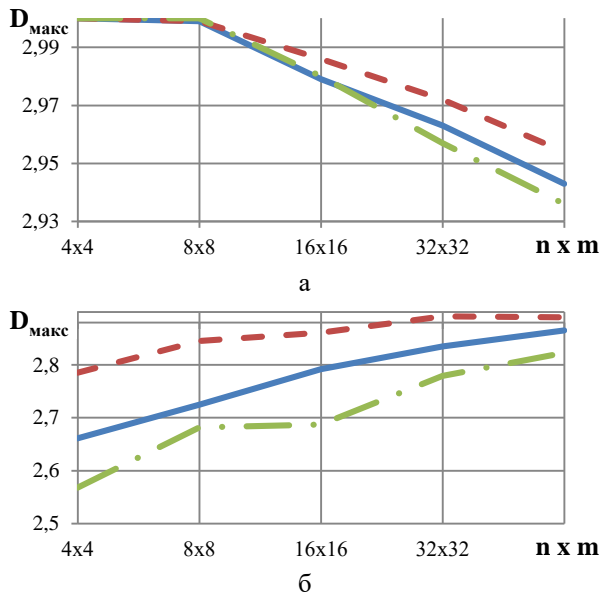


Рис. 6. Залежності мінімальних (а) і максимальних (б) значень ФР, що є на зображеннях, від величини «ковзаючого вікна»

Як видно на рис. 6, а максимальні значення ФР зменшуються із збільшенням розмірів «ковзального вікна» починаючи від «вікна» розміром 16×16 пікселів. Характер зменшення максимальних значень ФР практично однаковий для різночасових знімків. Значення  $D_{\max}$  зменшуються із збільшенням «вікна» з 8×8 до 64×64 пікселів на величини  $\Delta D_{\max} = 0,061$ ,  $\Delta D_{\max} = 0,048$ ,  $\Delta D_{\max} = 0,078$  залежно від часу отримання знімка. Як видно з цих значень, зменшення  $D_{\max}$  незначне. Така поведінка максимальних значень ФР обумовлена тим, на зображеннях існує деяка кількість відносно невеликих ділянок (розміром до 16×16 пікселів), які є однорідними та їх тривимірне представлення являє собою куб. Але при великих розмірах «вікна» (більше 16×16 пікселів) підстильна поверхня стає неоднорідною і максимальні значення ФР більше відрізняються від  $\Delta D_{\max} = 3,0$ . Тобто тривимірне представлення стає порізнаним і не є кубом. Таким чином, по величині зміни  $D_{\max}$  із збільшенням розмірів «ковзаючого вікна» можна зробити висновок про однорідність підстильної поверхні. Так тривимірне представлення зображення станом на 16.06.2018 (початкова фаза вегетації) має середню порізнаність ( $\Delta D_{\max} = 0,061$ ). З часом, знімок станом

на 09.07.2018 (початок дозрівання кукурудзи), тривимірне представлення стає менше порізнаним ( $\Delta D_{\max} = 0,048$ ), що свідчить про те, що посіви кукурудзи стають більш однорідними А на кінцевій фазі дозрівання кукурудзи (знімок станом на 29.07.2018) тривимірне зображення знову стає більш порізнаним ( $\Delta D_{\max} = 0,078$ ).

На рис. 6, б видно, що мінімальні значення ФР, на відміну від максимальних значень ФР, збільшуються із збільшенням розмірів «ковзаючого вікна» від 4×4 до 64×64. Для космічного знімка станом на 16.06.2018 ФР збільшується на  $\Delta D_{\min} = 0,204$ , станом на 09.07.2018 –  $\Delta D_{\min} = 0,105$ , станом на 29.07.2018 –  $\Delta D_{\min} = 0,255$ . Також на рис. 6, б видно, що мінімальні значення ФР на зображенні станом на 16.06.2018 (суцільна лінія) займають середнє положення у порівнянні з  $D_{\min}$  зображень станами на 09.07.2018 (пунктирна лінія) та на 29.07.2018 (штрих-пунктирна лінія). Така поведінка мінімальних значень ФР обумовлена тим, що на зображеннях існують деякі ділянки підстильної поверхні з великою порізнаністю, яка збільшується із збільшенням розміру «вікна».

Для космічного знімка станом на 29.07.2018 (штрих-пунктирна лінія на рис. 6, б) на кривій можна спостерігати пряму ділянку між «вікнами» з розмірами 8×8 та 16×16 пікселів, тобто мінімальні значення ФР при цих розмірах «вікна» практично не відрізняються. Така поведінка  $D_{\min}$  обумовлена наявністю на зображенні аномальної ділянки невеликих розмірів. На рис. 7, а і б наведені космічні знімки станом на 29.07.2018 на яких білими квадратами (знизу на зображенні) позначена аномальна ділянка (найбільш порізнана). Поле фрактальних розмірностей при обробці зображення будувалося з використанням «вікон» розміром 8×8 (рис. 7, а) і 16×16 (рис. 7, б) пікселів. Білі квадрати на зображення відповідають мінімальним діапазоном змін ФР  $\Delta D_{\min} = 2,682 - 2,7$  («вікно» розміром 8×8 пікселів) та  $\Delta D_{\min} = 2,687 - 2,7$  («вікно» розміром 16×16 пікселів). При більших розмірах «вікна» на зображенні проявляються інші області, в яких спостерігається більша порізнаність.

Таким чином, аномальна поведінка мінімальних значень ФР при зміні розмірів «ковзаючого вікна», що використовується під час побудови ПФР, дозволяє визначати на космічних знімках аномальні області різних розмірів. Аномальна поведінка  $D_{\min}$  також впливає і на характер зміни діапазону ФР, які є присутніми на зображенні, –  $\Delta D = D_{\max} - D_{\min}$ .

На рис. 8 показані залежності діапазону змін ФР ( $\Delta D$ ) від величини «ковзаючого вікна». Суцільна лінія відповідає космічному знімку станом на 16.06.2018, штрихова лінія – станом на 09.07.2018, а штрих-пунктирна – станом на 29.07.2018.

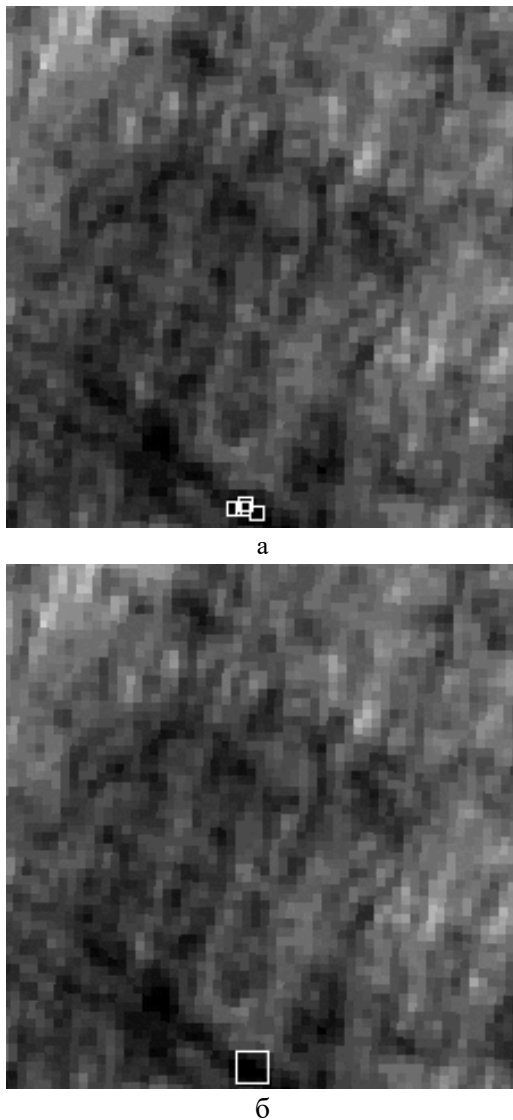


Рис. 7. Космічний знімок станом на 29.07.2018 з аномальною ділянкою (білі квадрати) при обробці «вікнами» розміром 8×8 (а) і 16×16 (б) пікселів

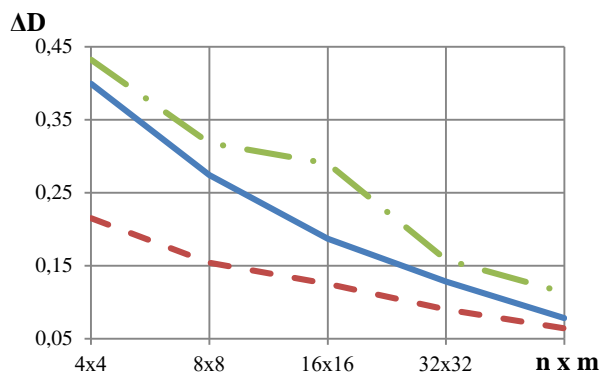


Рис. 8. Залежності діапазону змін ФР від величини «ковзаючого вікна»

На рис. 8 видно, що діапазон змін ФР звужується із збільшенням розмірів «ковзного вікна». Для космічного знімка станом на 16.06.2018 діапазон змін

ФР дорівнює  $\Delta D = 0,399$  («вікно» 4×4 пікселів) і  $\Delta D = 0,078$  («вікно» 64×64 пікселів). Для космічного зображення станом на 09.07.2018 –  $\Delta D = 0,215$  («вікно» 4×4 пікселів) і  $\Delta D = 0,064$  («вікно» 64×64 пікселів), а станом на 29.07.2018 –  $\Delta D = 0,432$  («вікно» 4×4 пікселів) і  $\Delta D = 0,113$  («вікно» 64×64 пікселів). Також на рис. 8 видно, що  $\Delta D$  на зображенні станом на 16.06.2018 (початкова фаза вегетації) займають середні положення у порівнянні з  $\Delta D$  на зображенні станом на 09.07.2018 (початкова фаза дозрівання кукурудзи), які є мінімальними, та  $\Delta D$  на зображенні станом на 29.07.2018 (кінцева фаза дозрівання кукурудзи), які є максимальними. Така поведінка  $\Delta D$  обумовлена тим, що на початковій фазі дозрівання посіви кукурудзи стають більш однорідними. Крім того, на рис. 8 також, як і на рис. 6, б, видно, що для космічного знімка станом на 29.07.2018 (штрих-пунктирна лінія) крива зміни  $\Delta D$  має особливість на ділянці між «вікнами» з розмірами 8×8 та 16×16 пікселів, що може свідчити про наявність аномалій на вихідному зображенні.

Таким чином, характер зміни діапазону ФР із збільшенням розмірів «ковзаючого вікна» може бути використано для визначення однорідності підстильної поверхні на космічних зображеннях, а також під час виявлення на них аномальних ділянок.

Розглянемо залежності середніх значень ФР ( $D_{сер}$ ) від величини «ковзаючого вікна», які показані на рис. 9 (суцільна лінія – космічний знімок станом на 16.06.2018, штрихова – станом на 09.07.2018, штрих-пунктирна – станом на 29.07.2018).

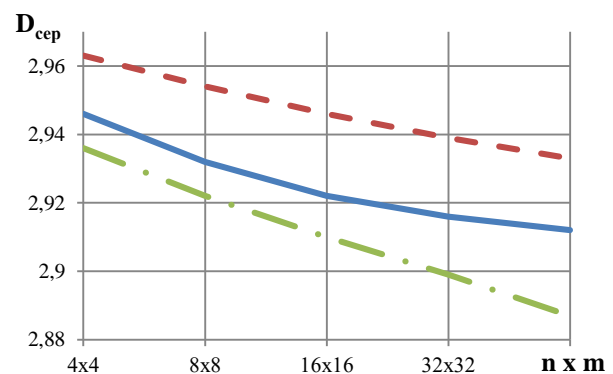


Рис. 9. Залежності середніх значень ФР від величини «ковзаючого вікна»

Як видно на рис. 9 середні значення ФР зменшуються із збільшенням розмірів «ковзаючого вікна». Але, необхідно зазначити, що при однакових розмірах «вікна» для різночасових знімків середні ФР будуть відрізнятися, що може бути використано для характеристики фази вегетації рослинності. Наприклад, для «вікна» розміром 16×16 пікселів для космічного знімка станом на 16.06.2018 середнє значення



ФР дорівнює  $D_{\text{ср}} = 2,922$ , станом на 09.07.2018 –  $D_{\text{ср}} = 2,946$ , а станом на 29.07.2018 –  $D_{\text{ср}} = 2,91$ . Якщо порівняти характер змін індексу NDVI для цих зображень ( $\text{NDVI}_{16.06} = 0,6876$ ,  $\text{NDVI}_{09.07} = 0,77$ ,  $\text{NDVI}_{29.07} = 0,6622$ ) з змінами середніх значень ФР, то можна побачити, що вони ідентичні. Також, як і індекс NDVI, середнє значення ФР збільшується при переході від початкової фази вегетації (знімок станом на 16.06.2018) до початкової фази дозрівання кукурудзи (знімок станом на 09.07.2018), а потім зменшується до мінімальних значень на кінцевій фазі дозрівання кукурудзи (знімок станом на 29.07.2018).

На рис. 10 показані залежності середніх значень ФР ( $D_{\text{ср}}$ ) від дати отримання космічного знімка (фази вегетації кукурудзи). Суцільна лінія відповідає розміру «вікна»  $4 \times 4$  пікселів, штрихова лінія –  $8 \times 8$  пікселів, штрих-пунктирна –  $16 \times 16$  пікселів, а точкова –  $32 \times 32$  пікселів.

На рис. 10 видно, що для всіх розмірів «ковзаючого вікна» характер змін середніх значень ФР однаковий. Спочатку середнє значення ФР збільшується, а потім зменшується до мінімальних значень. Як зазначалося вище, такий же характер зміни мають індекси NDVI. Але всі середні значення ФР для різночасових знімків зменшуються із збільшенням розмірів «вікна». При цьому із збільшенням розмірів «вікна» різниця між сусідніми  $D_{\text{ср}}$  зменшується. Найбільша різниця між  $D_{\text{ср}}$  буде при збільшенні розмірів «вікна» з  $4 \times 4$  до  $8 \times 8$  пікселів. Так для знімку станом на 16.06.2018 різниця буде складати  $\Delta D_{\text{ср}} = 0,125$ , для знімку станом на 09.07.2018 –  $\Delta D_{\text{ср}} = 0,061$  і для знімку станом на 29.07.2018 –  $\Delta D_{\text{ср}} = 0,114$ .

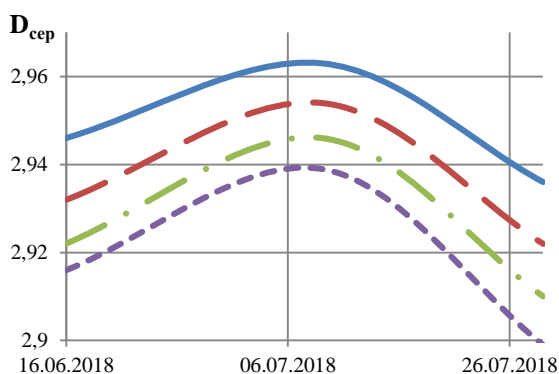


Рис. 10. Залежності середніх значень ФР від дати отримання космічного знімка

Таким чином, проведений аналіз показав, що характер змін середніх значень ФР такий же, як і у індексів NDVI для різночасових космічних знімків поля з посівами кукурудзи. Але величини середніх значень ФР залежать від розмірів «ковзаючого вікна». Також необхідно зазначити, що із збільшенням розмірів «вікна» збільшується час на розрахунок ФР

у межах «вікна». Тому до початку обробки космічних знімків необхідно обрати розмір «вікна», який забезпечить компроміс між швидкістю обробки зображення та якістю виконання поставленої задачі (оцінки стану вегетації посівів). З наведеного вище аналізу можна запропонувати розмір «ковзного вікна», що дорівнює  $16 \times 16$  пікселів. У подальшому доцільно використовувати «вікно» зазначеного розміру під час побудови ПФР для всіх зображень однакового розміру на різних фазах вегетації посівів (для різночасових космічних знімків).

Для підвищення швидкості побудови ПФР під час обробки зображень великих розмірів замість «ковзаючого вікна» можна застосовувати «стрибаюче вікно». Без втрати інформативності зображень, максимальним «стрибком», який використовується під час побудови ПФР, може бути величина, що дорівнює розміру «вікна». Розрахуємо середні ФР космічних знімків поля кукурудзи з використанням «стрибаючого вікна». При цьому величина «стрибка» дорівнювалася розміру «вікна».

У табл. 1 наведені чисельні значення середніх фрактальних розмірностей космічних зображень, що розглядалися вище, з використанням «ковзаючого» і «стрибаючого» «вікон».

Таблиця 1

Величини середніх значень ФР космічних зображень з використанням «ковзаючого» і «стрибаючого» «вікон»

Тип і розмір «вікна»	Значення середніх ФР		
	16.06.18	09.07.18	29.07.18
«ковзаюче», $4 \times 4$	2,946	2,963	2,936
«стрибаюче», $4 \times 4$	2,946	2,963	2,936
«ковзаюче», $8 \times 8$	2,932	2,954	2,922
«стрибаюче», $8 \times 8$	2,932	2,954	2,922
«ковзаюче», $16 \times 16$	2,922	2,946	2,910
«стрибаюче», $16 \times 16$	2,924	2,945	2,912
«ковзаюче», $32 \times 32$	2,916	2,939	2,899
«стрибаюче», $32 \times 32$	2,915	2,936	2,900
«ковзаюче», $64 \times 64$	2,912	2,933	2,887
«стрибаюче», $64 \times 64$	2,912	2,929	2,889

Як видно з аналізу даних, наведених у табл. 1, середні значення ФР практично не залежать від типу «вікна», що застосовується під час побудови ПФР. Невеликі відмінності від 0,001 до 0,004 спостерігаються при збільшенні розміру «вікна». Але швидкість обробки зображення з використанням «стрибаючого вікна» підвищується пропорційно до величини «стрибка», яка дорівнює розміру «вікна». Для запропонованого вище розміру «вікна» – 16×16 пікселів, відмінності складають 0,001 – 0,002, що не впливає на якість обробки космічних знімків. Тому для швидкої обробки зображень доцільно використовувати величину «стрибка», яка дорівнює 16 пікселів.

Таким чином, запропонований підхід дозволяє проводити оцінку стану сільськогосподарських культур з використанням фрактальних розмірностей. Характер зміни середніх значень ФР ідентичний до зміни індексу NDVI на різночасових космічних знімках посівів кукурудзи. При цьому під час побудови ПФР використовується дані тільки з одного каналу супутника Sentinel-2 (канал b8), а для розрахунку індексу NDVI необхідно отримувати дані з двох каналів (канали b8 і b4). Шкала середніх значень ФР дозволяє виявити якісну зміну біомаси.

## Висновки

Для моніторингу сільськогосподарських культур сільгоспвиробники можуть застосовувати космічні знімки Sentinel-2, які періодично (5-6 знімків на місяць на задану територію) розміщуються у вільному доступі у мережі Інтернет. Періодичність і просторове розрізнення (до 10 м) космічних знімків Sentinel-2 можуть забезпечити моніторинг посівів на всіх фазах їх вегетації. Але візуальний аналіз таких знімків не дозволяє кількісно оцінити стан біомаси на різних фазах вегетації.

Найбільш часто для визначення кількісного стану біомаси застосовується нормалізований різницевий вегетаційний індекс NDVI у різні часові інтервали. Але індекс NDVI стає не ефективним в періоди, коли рослинність є послабленою або спостерігається низький рівень вегетації. У зв'язку з цим представляє практичний інтерес оцінити можливість застосування фрактального аналізу космічних знімків сільськогосподарських культур на різних фазах вегетації.

Для аналізу складних геометричних структур, якими є тривимірне представлення космічних знімків сільськогосподарських культур, доцільно використовувати ФР. Основою фрактального аналізу цифрових зображень є побудова ПФР, під час якого проводиться сканування зображення «вікном» заданого розміру та з заданим кроком переміщення. Для кожного положення «вікна» визначається чисельне значення ФР, яка записується в матрицю ФР.

Проведено аналіз змін величин ФР на різночасових космічних зображеннях поля з кукурудзою на зерно від величини «ковзаючого вікна». Досліджені залежності максимальних і мінімальних значень ФР, що є на зображеннях, від величини «вікна». Показано, що за величиною змін максимальних значень ФР із збільшенням розмірів «вікна» можна оцінити однорідність підстильної поверхні. Встановлено, що характер зміни мінімальних значень ФР при зміні розмірів «вікна» обумовлений тим, що на знімках існують ділянки підстильної поверхні з великою порізаністю, а аномальна поведінка цих значень дозволяє визначати аномальні області різних розмірів на космічних знімках. Також досліджено характер зміни діапазону ФР із збільшенням розмірів «вікна», що може бути використано для визначення однорідності підстильної поверхні на космічних знімках, а також під час виявлення на них аномальних ділянок.

Проведено аналіз змін середніх значень ФР із збільшенням розмірів «ковзаючого вікна». Показано, що при однакових розмірах «вікна» для різночасових знімків середні ФР будуть відрізнятися, що може бути використано для характеристики фази вегетації рослинності. Встановлено, що характер змін середніх значень ФР такий же, як і індексів NDVI для різночасових космічних знімків поля з посівами кукурудзи, а також що величини середніх значень ФР залежать від розмірів «вікна». Запропоновано розмір «вікна», який забезпечує компроміс між швидкістю обробки зображення та якістю оцінки стану вегетації посівів.

Показано, що для підвищення швидкості побудови ПФР під час обробки зображень великих розмірів доцільно замість «ковзаючого вікна» застосовувати «стрибаюче вікно». Зазначено, що величина «стрибка» може дорівнюватися розміру «вікна». Така величина «стрибка» забезпечує максимальну швидкість та не впливає на якість обробки космічних знімків посівів.

Отже, запропонований підхід дозволяє проводити оцінку стану сільськогосподарських культур з використанням ФР. Характер зміни середніх значень ФР ідентичний до зміни індексу NDVI на різночасових космічних знімках посівів кукурудзи. При цьому під час побудови ПФР використовується дані тільки з одного каналу супутника Sentinel-2 (канал b8), а для розрахунку індексу NDVI необхідно отримувати дані з двох каналів (канали b8 і b4). Шкала середніх значень ФР дозволяє виявити якісну зміну біомаси.

Під час подальших досліджень, доцільно здійснити фрактальний аналіз космічних знімків Sentinel-2 для інших сільськогосподарських культур на різних фазах вегетації.

## Література

1. *Remote Sensing and Cropping Practices: A Review [Text]* / A. Bégué, D. Arvor, B. Bellon, J. Betbeder, D. de Aballeyra, R. P. D. Ferraz, V. Lebourgeois, C. Lelong, M. Simões, S. R. Verón // *Remote Sensing*. – 2018. – Vol. 10, Iss. 1. – P. 1-32. DOI: 10.3390/rs10010103.
2. *Sentinel-2 for agriculture national demonstration in Ukraine: Results and further steps [Text]* / N. Kussul, A. Kolotii, A. Shelestov, M. Lavreniuk, N. Bellemans, S. Bontemps, P. Defourny, B. Koetz // *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Fort Worth, TX, USA, 23-28 July 2017*. – IEEE, 2017. – P. 5842-5845. DOI: 10.1109/IGARSS.2017.8128337.
3. Дрони і супутники: моніторинг стану посівів впродовж сезону [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://smartfarming.ua/ua-blog/monitoring-sostoyaniya-posevov-v-techenie-sezona> – 28.05.2020.
4. *Land cover and crop classification using multitemporal Sentinel-2 images based on crops phenological cycle [Text]* / A. Khaliq, L. Peroni, M. Chiaberge // *IEEE Workshop on Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems (EESMS), Salerno, Italy, 21-22 June 2018*. – IEEE, 2018. – P. 1-5. DOI: 10.1109/EESMS.2018.8405830.
5. *Meeting Earth Observation Requirements for Global Agricultural Monitoring: An Evaluation of the Revisit Capabilities of Current and Planned Moderate Resolution Optical Earth Observing Missions [Text]* / A. K. Whitcraft, I. Becker-Reshef, B. D. Killough, Ch. O. Justice // *Remote Sensing*. – 2015. – Vol. 7, Iss. 2. – P. 1482-1503. DOI: 10.3390/rs70201482.
6. *Copernicus Europe's eyes on Earth, Sentinel-2 [Електронний ресурс]* / Copernicus Europe's eyes on Earth. – Режим доступу: <https://www.copernicus.eu/en/about-copernicus/infrastructure/discover-our-satellites> – 09.09.2020.
7. Слободяник, М. П. Прогнозування врожайності сільськогосподарських культур за матеріалами ДЗЗ та вегетаційними індексами [Текст] / М. П. Слободяник // *Вісник геодезії та картографії*. – 2014. – № 6 (93). – С. 16 – 20.
8. Черепанов, А. С. *Вегетационные индексы [Текст]* / А. С. Черепанов // *ГЕОМАТИКА*. – 2011. – № 2 (11). – С. 98–102.
9. Доля, Г. Н. *Фрактальный анализ процессов, структур и сигналов [Текст]* : коллективная монография / Г. Н. Доля, В. К. Иванов, Р.Э. Пащенко ; под ред. Р.Э. Пащенко. – Харьков : ХООО НЭО «ЭкоПерспектива», 2006. – 348 с.
10. *Распознавание типов почв с помощью фрактальных методов обработки космических изображений [Текст]* / Р. Э. Пащенко, С. Е. Яцевич, Е. И. Яцевич, Л. А. Егорова // *Збірник наукових праць «Системи обробки інформації»*. – X. : XV ПС, 2014. – Вип. 6(122). – С. 74 – 76.
11. *ESA Copernicus, Copernicus Open Access Hub [Електронний ресурс]* / ESA Copernicus. – Режим доступу: <https://scihub.copernicus.eu> – 11.09.2020.
12. *USGS (United States Geological Survey), GloVis (Global Visualization Viewer) [Електронний ресурс]* / USGS (United States Geological Survey). – Режим доступу: <https://glovis.usgs.gov> – 13.09.2020.
13. *ESA Sentinel Online, Spatial Resolution [Електронний ресурс]* / ESA Sentinel Online. – Режим доступу: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-psi/resolutions/spatial> – 17.09.2020.
14. *ESA Sentinel Online, Naming Convention [Електронний ресурс]* / ESA Sentinel Online. – Режим доступу: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-psi/naming-convention> – 21.09.2020.
15. Марюшко, М. В. Моніторинг сільськогосподарських культур із застосуванням космічних знімків SENTINEL-2 [Текст] / М. В. Марюшко, Р. Е. Пащенко, Н. С. Коблюк // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2019. – №1(89). – С. 99-108. DOI: 10.32620/reks.2019.1.11.
16. *Мандельброт, Б. Фрактальная геометрия природы [Текст]* / Б. Мандельброт. – М. : Институт компьютерных исследований, 2002. – 656 с.
17. *Кроновер, Р. М. Фракталы и хаос в динамических системах [Текст]* / Р. М. Кроновер. – М. : Постмаркет, 2000. – 352 с.
18. *Kobliuk, N. Information technology of aerospace images fractal analysis [Text]* / N. Kobliuk, R. Pashchenko, M. Mariushko // *IEEE 2019 14th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies, CSIT 2019 – Proceedings*. – 2019. – P. 102-105. DOI: 10.1109/STC-CSIT.2019.8929888.
19. *Pashchenko, R. Analysis of the Earth's Surface Type in Remote Sensing Using Fractal Dimension [Text]* / R. Pashchenko, M. Mariushko // *2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW), MRRS-2020*. – 2020. – P. 1-4. DOI: 10.1109/ukrmw49653.2020.9252811.
20. *Mariushko, M. Cloud System ArcGIS Online as a Managerial Decision-Making Tool in Agricultural Production [Text]* / M. Mariushko, R. Pashchenko, A. Nechausov // *Conference Proceedings of 2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies DESSERT'2018*. – 2018. – pp. 564-568. DOI: 10.1109/DESSERT.2018.8409190.

## References

1. Bégué, A., Arvor, D., Bellon, B., Betbeder, J., D. de Abelleira, Ferraz, R. P. D., Lebourgeois, V., Lelong, C., Simões, M., Verón, S. R. Remote Sensing and Cropping Practices: A Review. *Remote Sensing*, 2018, vol. 10, iss. 1, pp. 1-32. DOI: 10.3390/rs10010103.
2. Kussul, N., Kolotii, A., Shelestov, A., Lavreniuk, M., Bellemans, N., Bontemps, S., Defourny, P., Koetz, B. Sentinel-2 for agriculture national demonstration in Ukraine: Results and further steps. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Fort Worth, TX, USA, 23-28 July 2017*, IEEE, 2017, pp. 5842-5845. DOI: 10.1109/IGARSS.2017.8128337.
3. *Drony` i suputny`ky`, Monitory`ng stanu posiviv vprodovzh sezonu*. Available at: <https://smartfarming.ua/ua-blog/monitoring-sostoyani-ya-posevov-v-techenie-sezona> (accessed 28.05.2020).
4. Khaliq, A., Peroni, L., Chiaberge, M. Land cover and crop classification using multitemporal Sentinel-2 images based on crops phenological cycle. *IEEE Workshop on Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems (EESMS), Salerno, Italy, 21-22 June 2018*, IEEE, 2018, pp. 1-5. DOI: 10.1109/EESMS.2018.8405830.
5. Whitcraft, A. K., Becker-Reshef, I., Kilough, B. D., Justice, Ch. O. Meeting Earth Observation Requirements for Global Agricultural Monitoring: An Evaluation of the Revisit Capabilities of Current and Planned Moderate Resolution Optical Earth Observing Missions. *Remote Sensing*, 2015, vol. 7, iss. 2, pp. 1482-1503. DOI: 10.3390/rs70201482.
6. *Copernicus Europe's eyes on Earth, Sentinel-2*. Available at: <https://www.copernicus.eu/en/about-copernicus/infrastructure/discover-our-satellites> (accessed 09.09.2020).
7. Slobodyany`k, M. P. *Prognozuvannya vrozhajnosti sil`s`kogospodars`ky`x kul`tur za materialamy` DZZ ta vegetacijny`my` indeksamy`* [Crop yield forecasting based on remote sensing materials and vegetation indices]. *Visny`k geodeziyi ta kartografiyi*, 2014, vol. 6 iss. 93, pp. 16-20.
8. Cherepanov, A. S. Vegetacionnye indeksy [Vegetation indices]. *GEOMATIKA*, 2011, vol. 2 iss. 11, pp. 98-102.
9. Dolja, G. N., Ivanov, V. K., Pashhenko, R. Je. *Fraktal'nyj analiz processov, struktur i signalov* [Fractal analysis of processes, structures and signals]. Har'kov, HOOO NJeO «JekoPerspektiva», 2006. 348 p.
10. Pashhenko, R. Je., Jacevich, S. E., Jacevich, E. I., Egorova, L. A. *Raspoznavanie tipov pochv s pomoshh'ju fraktal'nyh metodov obrabotki kosmicheskikh zobrazhenij* [Recognition of soil types using fractal methods of space image processing]. *Zbirny`k naukovy`x prac` «Sy`stemy` obrobky` informaciyi»*, 2014, vol. 6 iss. 122, pp. 74-76.
11. *ESA Copernicus, Copernicus Open Access Hub*. Available at: <https://scihub.copernicus.eu> (accessed 11.09.2018).
12. *USGS (United States Geological Survey), GloVis (Global Visualization Viewer)*. Available at: <https://glovis.usgs.gov> (accessed 13.09.2020).
13. *ESA Sentinel Online, Spatial Resolution*. Available at: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/resolutions/spatial> (accessed 17.09.2020).
14. *ESA Sentinel Online, Naming Convention*. Available at: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/naming-convention> (accessed 21.09.2020).
15. Maryushko, M. V., Pashhenko, R. E., Koblyuk, N. S. *Monitory`ng sil`s`kogospodars`ky`x kul`tur iz zastosuvannyam kosmichny`x znmkiv Sentinel-2* [Monitoring agricultural crops using Sentinel-2 satellite imagery]. *Radioelektronni i komp'uterni sistemi – Radioelectronic and computer systems*, 2019, vol. 1 iss. 89, pp. 99-108. DOI: 10.32620/reks.2019.1.11.
16. Mandel'brot, B. *Fraktal'naja geometrija prirody* [Fractal geometry of nature]. Moscow, Institut komp'uternykh issledovaniy Publ., 2002. 656 p.
17. Kronover, R. M. *Fraktaly i haos v dinamicheskikh sistemah* [Fractals and chaos in dynamical systems]. Moscow, Postmarket Publ., 2000. 352 p.
18. Kobliuk, N., Pashchenko, R., Mariushko, M. Information technology of aerospace images fractal analysis. *IEEE 2019 14th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies, CSIT 2019 – Proceedings. Lviv, Ukraine, 17-20 September, 2019*, IEEE, 2019, pp. 102-105. DOI: 10.1109/STC-CSIT.2019.8929888.
19. Pashchenko, R., Mariushko, M. Analysis of the Earth's Surface Type in Remote Sensing Using Fractal Dimension. *2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW), MRRS-2020, Kharkiv, Ukraine, 21-25 September, 2020*, IEEE, 2020, pp. 1-4. DOI: 10.1109/ukrmw49653.2020.9252811.
20. Mariushko, M., Pashchenko, R., Nechausov, A. Cloud System ArcGIS Online as a Managerial Decision-Making Tool in Agricultural Production. *Conference Proceedings of 2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT'2018), Kyiv, Ukraine, 24-27 May, 2018*, IEEE, 2018, pp. 564-568. DOI: 10.1109/DESSERT.2018.8409190.

## ФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ SENTINEL-2 ДЛЯ МОНИТОРИНГА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР

*М. В. Марюшко, Р. Э. Пашенко*

**Предметом** изучения в статье является применение новых подходов к обработке пространственной информации со спутников для более эффективной и оперативной оценки состояния сельскохозяйственных культур, что обусловлено растущей тенденцией доступности данных дистанционного зондирования Земли, которые благодаря улучшению пространственного и временного разрешения могут применяться в задачах анализа состояния растительных покровов и других связанных с этим работ. **Целью** статьи является оценка возможности обработки космических снимков спутника Sentinel-2 с использованием фрактальных размерностей для мониторинга сельскохозяйственных культур на разных фазах вегетации. **Задача:** исследование метода построения фрактальных размерностей для космических снимков со спутника Sentinel-2 для оценки состояния сельскохозяйственных культур на протяжении всей фазы вегетации, оценка связи между изменением средних значений ФР и изменения индекса NDVI на разновременных космических снимках, определения преимущества в применении метода расчета фрактальных размерностей по сравнению с индексом NDVI. Получены следующие **результаты**. Было установлено, что чаще всего для определения количественного состояния биомассы применяется индекс NDVI в различные временные интервалы. Но данный индекс становится неэффективным в периоды ослабления активной фазы вегетации. В связи с этим представляется практический интерес для оценки возможности применения фрактального анализа космических снимков сельскохозяйственных культур на разных фазах вегетации. Основой фрактального анализа цифровых изображений является построение полей фрактальных размерностей. Проведен анализ изменений величин ФР на разновременных космических изображениях поля с кукурузой на зерно от величины «скользящего окна». Исследованы зависимости максимальных и минимальных значений ФР, которые есть на изображениях, от величины «окна». Показано, что по величине изменений максимальных значений ФР с увеличением размеров «окна» можно оценить однородность подстилающей поверхности. Установлено, что характер изменения минимальных значений ФР при изменении размеров «окна» обусловлен большой изрезанностью подстилающей поверхности на снимках, а аномальное поведение этих значений позволяет определять аномальные области различных размеров на космических снимках. Также исследован характер изменения диапазона ФР с увеличением размеров «окна», что может быть использовано для определения однородности подстилающей поверхности на космических снимках, а также при обнаружении на них аномальных участков. Проведен анализ изменений средних значений ФГ с увеличением размеров «скользящего окна». Показано, что при одинаковых размерах «окна» для разновременных снимков средние ФГ будут отличаться, что может быть использовано для характеристики фазы вегетации растительности. Установлено, что характер изменений средних значений ФГ такой же, как и индексов NDVI для разновременных космических снимков поля с посевами кукурузы, а также величины средних значений ФР зависят от размеров «окна». Предложено размер «окна», который обеспечивает компромисс между скоростью обработки изображения и качеством оценки состояния вегетации посевов. Показано, что для повышения скорости построения ПФР во время обработки изображений больших размеров целесообразно вместо «скользящего окна» применять «прыгающее окно». Отмечено, что величина «скачка» может равняться размеру «окна». Такая величина «скачка» обеспечивает максимальное быстродействие и не влияет на качество обработки космических снимков посевов. **Выводы.** Предложенный подход к обработке пространственных данных со спутников позволяет проводить оценку состояния сельскохозяйственных культур с использованием ФР. Характер изменения средних значений ФР идентичен изменению индекса NDVI на разновременных космических снимках посевов кукурузы. При этом во время построения ПФР могут использоваться данные только с одного канала спутника Sentinel-2 (например, из ближнего инфракрасного канала – b8), а для расчета индекса NDVI необходимо получать данные из двух каналов (с ближнего инфракрасного и красного каналов – каналы b8 и b4 спутника Sentinel-2 соответственно), что позволит уменьшить время на обработку. Шкала средних значений ФР позволяет выявить качественное изменение биомассы. Во время дальнейших исследований, целесообразно осуществить фрактальный анализ космических снимков Sentinel-2 для других сельскохозяйственных культур на разных фазах вегетации.

**Ключевые слова:** космические снимки Sentinel-2; мониторинг сельскохозяйственных культур; индекс NDVI; фрактальный анализ; фрактальная размерность.

## FRactal Analysis of Sentinel-2 Satellite Imagery for Monitoring of Agricultural Crops

*M. Mariushko, R. Pashchenko*

The **subject** of the study in the article is using the new approach to the processing of spatial information from satellites for more effective and operational evaluation of crops. This is due to the growing trend of access to remote sensing data, due to the improvement of spatial and temporal resolution, which can be used in the analysis of vegetation cover and other related work. The **goal** of the article is the capability assessment of processing the Sentinel-2

satellite imagery using fractal dimensions to agricultural plant monitoring at different phases of the vegetative. The **tasks**: to research the method of constructing fractal dimensions for the Sentinel-2 satellite imagery to assess the state of crops during the vegetative phase; to assess the relationship between changes in FD averages and changes in the NDVI index of different time series remote images, to determine the advantage of calculation method fractal dimensions compared to the NDVI index. The following **results** were obtained. It was found that the NDVI index is most often used to quantify the state of biomass during different time intervals. But this index becomes ineffective during periods of weakening of the vegetation active phase. Accordingly, it is of practical interest to evaluate the possibility of using fractal analysis of agricultural crop satellite imagery at different vegetation phases. The basis of fractal analysis of digital images is the formation of fractal dimensions fields. The analysis of changes in the FD values on different remote images time series of the grain cornfields from the «sliding window» values is carried out. The dependences of the maximum and minimum values of FD, which are in the images, on the «window» size are investigated. It is shown that the homogeneity of the underlying surface can be estimated from the magnitude of changes in the maximum values of FD with the increasing size of the «window». It is established that the pattern of the change of the FD minimum values when changing the «window» size is due to the large sharpness of the underlying surface in the images, and the anomalous behavior of these values allows determining anomalous areas of different sizes in satellite imagery. The pattern of the change in the range of FD with increasing size of the «window», which can be used to determine the homogeneity of the underlying surface in satellite imagery, as well as during the detection of abnormal areas on them. The change analysis of FD average values with an increase in the sizes of «sliding window» is carried out. It is shown that with the same size of the «window» for different image time series, the average FD will be different, which can be used to characterize the agriculture crop vegetation phase. It is established that the pattern of changes in the FD average values is the same as the NDVI indices for different satellite imagery time series of the corn crop fields and that the magnitudes of the FD average values depend on the size of the «window». The size of the «window» is recommended, which provides accommodation between the speed of image processing and the quality of the assessment state vegetation crop. It is shown that to increase the speed of formation of the FFD during the processing of large images, it is advisable to use a «jumping window» instead of a «sliding window». It is mentioned that the «jump» value can be equal to the «window» size. This «jump» value provides maximum speed and does not affect the crop satellite imagery processing quality. **Conclusions.** The recommended approach to the processing of spatial data from satellites allows assessing the crops' consistency using FD. The pattern of the change in the FD mean values is identical to the NDVI change in different satellite imagery time series of corn crops. In that event, when forming the FFD, data from only one channel of the Sentinel-2 satellite can be used (for example, from the near-infrared channel – b8), and to calculate the NDVI index it is necessary to obtain data from two channels (from the near-infrared and red channels – channels b8 and b4 of the satellite Sentinel-2, respectively), which will reduce the processing time. The scale of FD average values allows detecting a qualitative change in biomass. During further research, it is advisable to perform fractal analysis of Sentinel-2 satellite imagery for other crops at different phases of the vegetation.

**Keywords:** Sentinel-2 satellite imagery; crop monitoring; NDVI index; fractal analysis; fractal dimension.

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

**Пащенко Руслан Едуардович** – д-р техн. наук, проф., Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України, Харків, Україна.

**Maksym 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: 0000-0003-3743-8535.

**Ruslan Pashchenko** – Doctor of Technical Sciences, Professor, O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkov, Ukraine, e-mail: rus.paschenko@yandex.ua. ORCID: 0000-0001-6218-0324.