

Р. Е. Пашенко¹, М. В. Марюшко²

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

²Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна

МОНІТОРИНГ ЗМІН СТАНУ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ ЗЕМЕЛЬ ЗА ДАНИМИ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛІЗУ КОСМІЧНИХ ЗНІМКІВ

Анотація. Відсутність загальних підходів до оцінки стану сільськогосподарських земель за даними ДЗЗ показує, що задача моніторингу змін їх стану є до кінця не вирішеною. У статті розглянута можливість використання фрактального аналізу космічних знімків супутника Sentinel-2 сільськогосподарських земель для визначення змін їх стану під впливом різних чинників. Оцінені характеристики космічних знімків супутника Sentinel-2 заданої території з сільськогосподарськими полями на них. Наведено порядок побудови поля фрактальних розмірностей та розрахунку фрактальної розмірності з використанням методів, які найчастіше застосовують на практиці для аналізу цифрових зображень – методи покриття і призми. Показано, що розрахунок і візуалізація ПФР космічних знімків сільськогосподарських земель дозволяє здійснювати їх сегментацію і виділяти межі проведених польових робіт, зміну їх у часі та оцінювати їх структуру після завершення робіт. Визначено, що під час фрактального аналізу космічних знімків супутника Sentinel-2 доцільно використовувати мінімальні або різниці фрактальних розмірностей. Показано, що для автоматизації процесу сегментації різних структур на космічному знімку можна застосовувати гістограму ПФР і селективні зображення. Запропоновано метод моніторингу змін стану сільськогосподарських земель з використанням фрактального аналізу, який дозволяє визначити межі аномалій на зображенні, початок зміни стану земель, обсяг проведених робіт та їх тривалість, а також оцінювати структуру земель.

Ключові слова: моніторинг стану сільськогосподарських земель, космічний знімок, фрактальний аналіз, фрактальна розмірність.

Вступ

Моніторинг сільськогосподарських земель дозволяє регулярно отримувати інформацію про стан і структуру земельних ділянок та посівних площ, а також здійснювати виявлення ділянок землі, що заросли чагарником, або мають ерозійні порушення, збільшені вологу, заболочування та інші види деградації землі [1]. Крім того, агроекологічний моніторинг дозволяє оцінювати (виявляти факти) вплив природних, техногенних і антропогенних факторів на посіви сільськогосподарських культур [2].

У сучасних умовах динаміка проведення сільськогосподарських робіт потребує оперативної оцінки їх результатів і стану сільськогосподарських культур. Вирішення цих завдань забезпечує регулярний космічний моніторинг земель сільськогосподарського призначення, який забезпечує оперативність (актуальні знімки отримуються з періодичністю 5-8 діб), об'єктивність (отримані дані відображають реальний стан рослинності), єдине представлення результатів (інформація надходить від відкаліброваних датчиків) та оглядовість (отримуються знімки великої площі з просторовою роздільною здатністю на рівні 10-30 м) [3]. Крім того, останнім часом спостерігається тенденція зростання доступності до даних дистанційного зондування. Наприклад, космічні знімки Sentinel-2 надаються користувачам у вільному доступі через мережу Інтернет (існує актуальна та постійно поповнювальна база космічних знімків), що дозволяє їх застосування для вирішення різноманітних задач [4, 5]. Супутники Sentinel-2 дозволяють отримувати широкопосмугові мультиспектральні зображення з високим просторовим розподілом (в одному пікселі 10 м) за допомогою знімальної апаратури MSI (Multispectral Instrument) у 13 спектральних діапазонах [5]. Космічні

знімки супутника Sentinel-2 на задану територію можна отримувати 2 рази на тиждень.

Всі ці чинники є дуже важливими для організації моніторингу сільськогосподарських земель, але у більшій мірі достовірність одержуваних результатів залежить від способу обробки космічних знімків, а користувачів цікавить кінцевий результат і його представлення для прийняття управлінських рішень.

Більшість методів моніторингу стану сільськогосподарських земель базуються на використанні вегетаційних індексів (існує близько 160 варіантів таких індексів) [6], які визначаються емпірично і враховують фізичні властивості світла, відбиваючу здатність рослин та інші важливі характеристики. Найбільше розповсюдження отримав нормалізований різницевого вегетаційний індекс (NDVI). В [7] приведені результати досліджень змін індексу NDVI різночасових космічних знімків сільськогосподарських земель. У роботі вказується, що для розрахунку індексу NDVI необхідно дані з ближнього інфрачервоного та червоного каналів, що призводить до ускладнення отримання вихідного зображення. У роботі [8] також вказується, що індекс NDVI у значній мірі залежить від кількості активної біомаси та стає неефективним в періоди, коли рослинність є послабленою або спостерігається низький рівень вегетації.

Також для вирішення задач моніторингу підстильної поверхні та оцінки її стану у теперішній час широко використовуються дані гіперспектральної зйомки [9]. Спеціальні алгоритми аналізу таких знімків дозволяють визначити спектральні параметри поглинання рослинності. Але до апаратури отримання гіперспектральних знімків висуваються високі вимоги щодо її абсолютного або відносного радіометричного калібрування, яке у подальшому впливає на якість отриманих даних і на достовірність результатів їх обробки. Все це приводить до збільшення складності і вартості

апаратури отримання космічних знімків, а також до ускладнення алгоритмів їх обробки

Перспективним напрямком підвищення інформативності космічних знімків, які отримуються тільки в одному діапазоні хвиль, є застосування методів фрактального аналізу зображень [10, 11]. Різна складність поверхонь та рослинності приводить до різних форм цифрового зображення, складність яких можна кількісно оцінити за допомогою величини фрактальної розмірності (ФР). У роботі [12] на основі даних дистанційного зондування та використання ФР показана можливість розподілу різних типів ґрунтів, а у роботі [13] показана можливість застосування фрактального аналізу космічних знімків Sentinel-2 для оцінки стану посівів кукурудзи на різних фазах вегетації. Але в цих роботах не розглядаються питання моніторингу змін стану сільськогосподарських земель, які викликані впливом різних чинників. У зв'язку з цим представляє практичний інтерес провести аналіз величин ФР космічних знімків під час зміни стану сільськогосподарських земель, які обумовлені різними чинниками.

Мета статті: розглянути можливість використання фрактального аналізу космічних знімків сільськогосподарських полів для визначення змін їх стану під впливом різних чинників.

Характеристика космічних знімків сільськогосподарських полів

Моніторинг стану сільськогосподарських земель на великих територіях вимагає багато часу та великих людських трудовитрат. Для здійснення ефективного моніторингу їх стану будемо використовувати космічні знімки супутника Sentinel-2, які є у вільному доступі в мережі Інтернет [4, 5].

На відміну від використання вегетаційних індексів, коли необхідно застосовувати дані декількох спектральних каналів, під час фрактального аналізу достатньо одного каналу. Розглянемо можливість викорис-

тання ближнього інфрачервоного діапазону супутника Sentinel-2, якому відповідає канал b8 (832 нм). В цьому каналі фіксуються дані, що формуються за рахунок відбиття сонячного випромінювання хлорофілом рослин. Для оцінки змін стану сільськогосподарських земель було створено базу космічних знімків з супутника Sentinel-2 земель Вільхуватської сільської ради Чутівського району Полтавської області, переважну частину яких обробляє приватне сільськогосподарське підприємство «Дружба». База космічних знімків містить зображення за 2018 рік у чотирьох діапазонах (b2, b3, b4 – канали видимого діапазону; b8 – широка смуга ближнього інфрачервоного діапазону) з просторовим розрізненням 10 метрів. На рис. 1, а-г для прикладу наведено космічні знімки каналу b8 супутника Sentinel-2 станом на 04.06.18 (а), 26.06.18 (б), 29.07.18 (в), 05.08.18 (г).

Як видно на рис. 1, на космічних знімках супутника Sentinel-2 візуально розподіляються землі сільськогосподарського призначення, їх межі, а також виділяються елементи природного ландшафту (річки, яри та ін.), а також штучні об'єкти, створені людьми (дороги, будинки та ін.). При цьому поля мають різну форму з різним типом сільськогосподарських культур на них. Але візуально визначити тип цих культур неможливо, а визначення змін стану полів є важким завданням і потребує різночасових космічних знімків.

Для подальшого дослідження змін стану земель були вибрані чотири поля, які на рис. 1 позначені квадратами і цифрами:

- поле 1 з посівами кукурудзи (рис. 1, а, б) на якому проводилися польові роботи (рис. 1, в, г);
- поле 2 з посівами кукурудзи (рис. 1, а, в, г) над яким в одну добу були хмари (рис. 1, б);
- поле 3 з посівами соняшника (рис. 1, б, в, г) та тіні хмар на ньому (рис. 1, а);
- поле 4 з посівами ячменя (рис. 1, а, б, в) на якому проводилися польові роботи (рис. 1, г).

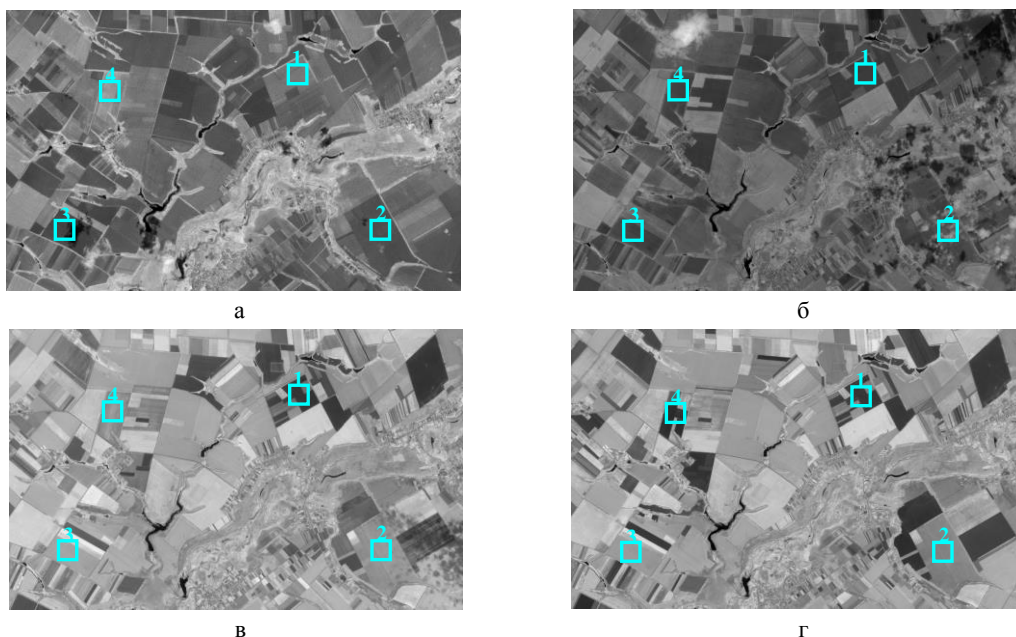


Рис. 1. Землі Вільхуватської сільської ради станом на 04.06.18 (а), 26.06.18 (б), 29.07.18 (в), 05.08.18 (г) в ближньому інфрачервоному діапазоні (канал b8)

Для подальшого фрактального аналізу змін стану сільськогосподарських земель з вихідних космічних знімків (які зберігаються у базі даних) необхідно провести попереднє вирізання зображень вибраних для дослідження полів (рис. 1). На рис. 2, а-з наведено елементи космічних знімків (канал b8) з полем 1 засіяним кукурудзою на зерно, на якому з часом проводилися польові роботи. Знімки були вибрані у різний час, станом на 01.06.18 (а), 14.06.18 (б), 29.06.18 (в), 29.07.18 (г), 05.08.18 (д), 08.08.18 (е), 10.08.18 (ж), 18.08.18 (з), щоб показати наявність на них різного стану поля. Зображення на рис. 2 представлені у градаціях сірого формату *.bmp і мають розміри 56×56 пікселів, при цьому операції поліпшення якості зображення не проводилися. Розмір зображення 56×56 пікселів був вибраний з міркувань отримання однорідної структури поля на знімку.

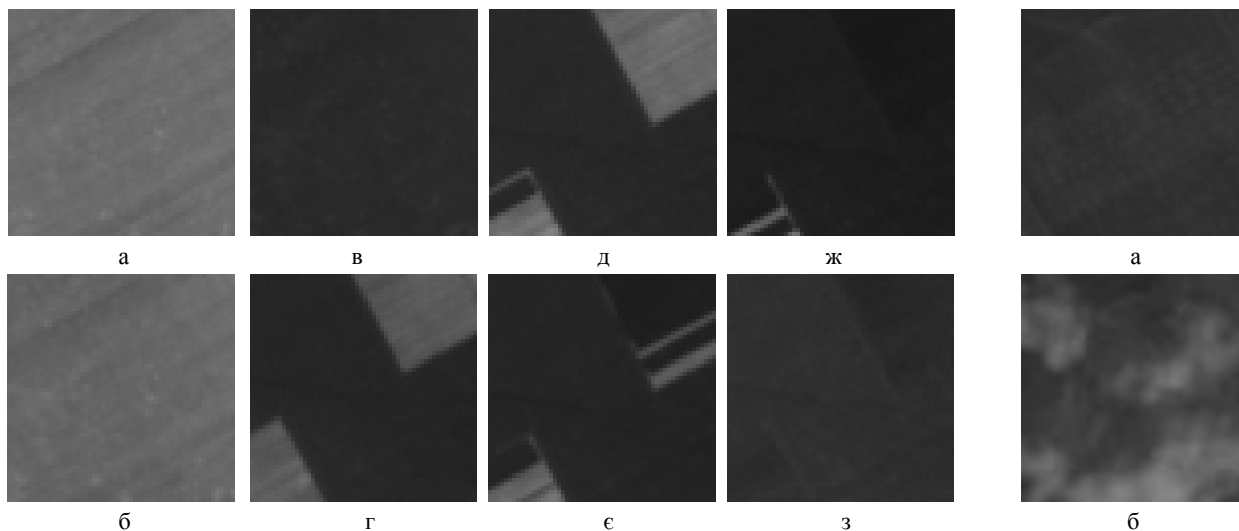
Аналіз даних, наведених на рис. 2, показує, що на знімках станом на 01.06.18 (а), 14.06.18 (б), 29.06.18 (в) спостерігається однорідне поле з кукурудзою на різних стадіях вегетації. На знімках ста-

ном на 29.07.18 (г), 05.08.18 (д), 08.08.18 (е), 10.08.18 (ж) видно, що проводилися польові роботи і стан поля змінювався, а на знімку станом на 18.08.18 (з) роботи були закінчені і знову спостерігається однорідне поле, але уже зоране. Але візуальний аналіз дозволяє лише якісно оцінити масштаби робіт і зміну структури поля. Кількісна оцінка цих змін без подальшої обробки неможлива.

На рис. 3, а, б наведено елементи космічних знімків (канал b8) з полем 2 засіяним кукурудзою станом на 26.06.18 (а) і станом на 29.06.18 (б), коли над цим полем були хмари. Зображення на рис. 3 також представлені у форматі *.bmp і мають розміри 56×56 пікселів.

Як видно з візуального аналізу космічних знімків, наведених на рис. 3, зображення поля станом на 26.06.18 (а) має однорідну структуру, а станом на 29.06.18 (б) має деякі зміни, що проявляються у вигляді неоднорідностей світлого кольору.

Як і у попередньому випадку без подальшої обробки кількісно оцінити зміну структури зображення неможливо.



Елементи космічних знімків (канал b8) з полем кукурудзи

Рис. 2. На полі проводилися польові роботи, станом на: 01.06.18 (а); 14.06.18 (б); 29.06.18 (в); 29.07.18 (г); 05.08.18 (д); 08.08.18 (е); 10.08.18 (ж); 18.08.18 (з)

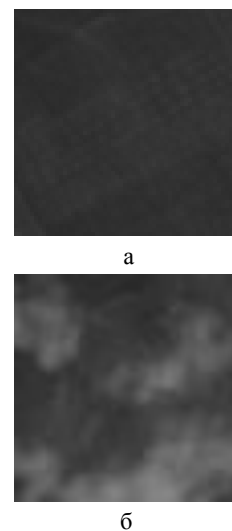


Рис. 3. Хмари над полем: 26.06.18 (а); 29.06.18 (б)

На рис. 4, а, б наведено елементи космічних знімків (канал b8) з полем 3 засіяним соняшником станом на 01.06.18 (а) і станом на 04.06.18 (б), коли на це поле падала тінь від хмар.

Розмір зображення на рис. 4 також складає 56×56 пікселів. Як і у попередніх випадках, зображення поля без аномалій (станом на 01.06.18) має однорідну структуру, а поява аномалії (станом на 04.06.18) проявляється у зміні його структури. Але під час виникнення аномалії за рахунок тіні хмари, зміна структури зображення візуально практично не спостерігається у зв'язку з низьким контрастом між зображенням поля і зображенням тіні хмари. Тому виявити її на зображенні дуже важко.

На рис. 5, а, б наведено елементи космічних знімків (канал b8) з полем 4 засіяним ячменем (станом на 29.07.18 (а)) на якому проводилися польові роботи (станом на 05.08.18 (б)). Розмір зображення

складає 56×56 пікселів. Знімки цього поля були вибрані для дослідження впливу на оцінку зміни стану поля типу сільськогосподарської культури та різного характеру його обробки.

Як видно на рис. 5, зображення поля станом на 29.07.18 має структуру, яка відрізняється від структури полів наведених вище (рис. 2, в, рис. 3, а, рис. 4, а), що проявляється у наявності на зображенні польової дороги та інших градацій сірого всього поля.

Структура обробленого поля станом на 05.08.18 також відрізняється від зображень польових робіт, наведених на рис. 2, г-ж. Для кількісної оцінки змін структури зображення поля необхідно проводити подальшу обробку.

Таким чином, візуальний аналіз космічних знімків дозволяє лише якісно оцінювати зміну стану сільськогосподарських земель.

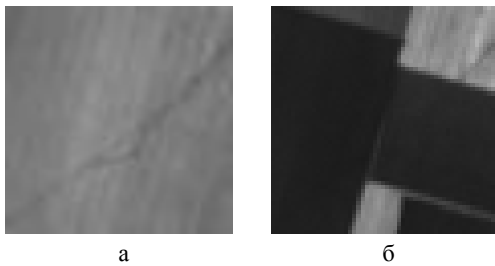


Рис. 4. Елементи космічних знімків (канал b8) з полем соняшника та тіні хмар на ньому, станом на: 01.06.18 (а); 04.06.18 (б)

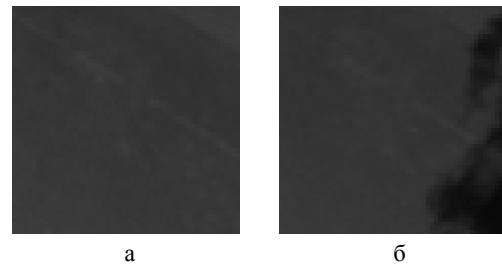


Рис. 5. Елементи космічних знімків (канал b8) з полем ячменю, на якому проводилися польові роботи, станом на: 29.07.18 (а); 05.08.18 (б)

Розрізнення типу поля з різним рослинним покривом і визначення типу аномалій, яка спостерігається на космічних знімках сільськогосподарських земель тільки за результатами візуального аналізу є важким завданням.

Проведемо обробку космічних знімків супутника Sentinel-2, розглянутих вище сільськогосподарських земель, у літній період 2018 року (з 01.06.18 до 28.08.18) з використанням фрактального аналізу.

Виявлення змін стану земель з використанням фрактальної розмірності

Під час моніторингу змін стану сільськогосподарських земель з використанням каналу b8 супутника Sentinel-2 носієм інформації на зображенні є світлові хвилі у ближньому інфрачервоному діапазоні, 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. В результаті отримуємо різнорідну матрицю значень інтенсивності відбиття сонячного випромінювання від земної поверхні (космічне зображення). Розмір матриці дорівнює розміру космічного зображення.

Основою фрактального аналізу космічних (цифрових) зображень є побудова поля фрактальних розмірностей (ПФР). Процес побудови ПФР детально розглянуто у роботі [11]. 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 «стрибає»). 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». Розмір ПФР буде менше розміру космічного зображення на величину «вікна» $(x - n) \times (y - m)$. Під час побудови ПФР у роботі розміри космічного зображення $(x \times y)$ будуть складати 56×56 пікселів, а розміри «ковзаючого вікна» будуть змінюватися від 4×4 пікселі до 32×32 пікселі.

Фрактальна розмірність є дробовою величиною, яка характеризує складність (порізанисть) форми, що заповнює простір. Більшому значенню ФР відповідає більша ступінь заповнення тривимірного

представлення зображення. 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 ФР [10]. Фрактальна розмірність сильно залежить від того, як її визначати, тобто окрім формули для розрахунку необхідно задати спосіб її визначення. На практиці найчастіше для аналізу цифрових зображень з використанням ФР застосовують метод покриття [14] і метод призми [15]. Метод покриття розрахунку ФР реалізує визначення розмірності Хаусдорфа-Безіковича, яка описується таким виразом:

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

де ε – довжина сторони куба (максимальна довжина дорівнює розміру «вікна»), яким покривають множину зображення; $N(\varepsilon)$ – кількість кубів, що накривають тривимірне уявлення зображення.

Метод призми розрахунку ФР забезпечує визначення розмірності таким виразом:

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

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

Безпосередньо за цими формулами розрахувати ФР зображення підстильної поверхні неможливо. Порядок визначення ФР полягає у наступному.

На першому етапі реалізації методу покриття вибирається деякий куб з стороною довжиною ε і цим кубом покривається тривимірне представлення зображення (множина I). На другому етапі підраховується скільки кубів з стороною ε накривають всю множину I (зображення) $N(\varepsilon)$.

На першому етапі реалізації методу призми за даними яскравості зображення у кутах «вікна» (основи призми) розміром ε формується верхня грань призми, а на другому етапі розраховується її площа $P(\varepsilon)$.

На третьому етапі в обох методах проводяться обчислення $N(\varepsilon)$ і $P(\varepsilon)$, відповідно, для декількох інших величин ε (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, наприклад, по чотири значення $N(\varepsilon)$ і $P(\varepsilon)$. Число значень (точок) залежить від структури (форми) вихідних даних.

Далі в обох методах будуються графіки логарифмічної залежності $\log N(\epsilon)$ або $\log P(\epsilon)$ від $\log 1/\epsilon$. За одержаними даними здійснюється лінійна апроксимація одержаних залежностей. Для апроксимації найчастіше використовується метод найменших квадратів (МНК), який дозволяє автоматизувати процес аналізу кутів нахилу для різних вхідних даних. На завершальному етапі фрактальна розмірність D визначається як тангенс кута нахилу апроксимованих прямих.

Таким чином, обчислення різних геометричних параметрів тривимірного уявлення зображення і використання методу найменших квадратів дозволяє визначати ФР космічних (цифрових) зображень.

Після розрахунку ПФР можна здійснити його візуалізацію, тобто весь діапазон змін ФР, що є у ПФР, розбивається на декілька рівнів (пороги сегментації). При цьому кожен рівень відображається відповідним кольором (виділяються сегменти із заданими ФР). При близьких структурах зображень в сусідніх «вікнах» ФР мають близькі значення (відрізняються в четвертому знаку після коми). «Вікна» з близькими значеннями ФР можуть бути об'єднані в окремі області, які забезпечують сегментацію зображення.

Для прикладу на рис. 6, а-є наведено візуальні представлення ПФР розраховані для космічних знімків з полем 1 засіяним кукурудзою на зерно на якому проводилися польові роботи, станом на 29.06.18 (а), 29.07.18 (б), 05.08.18 (в), 08.08.18 (г), 10.08.18 (д), 18.08.18 (є), які показані на рис. 2, в-з. Наведені ПФР космічних знімків були побудовані з використанням методу призми і «ковзаючого вікна» розміром 5×5 пікселів. Діапазон змін ФР розбивався на 5 рівнів.

Як видно на рис. 6, візуалізація ПФР дозволяє представити розподіл частин зображення з різною структурою, тобто здійснити його сегментацію. На рис. 6, а видно, що посіви кукурудзи без обробки, також мають деякі особливості, які на вихідному зображенні візуально не спостерігаються. На рис. 6, б-д видно, що побудова і візуалізація ПФР дозволяє досліджувати зміну стану сільськогосподарських земель, які обумовлені проведенням польових робіт. На ПФР добре визначаються межі ділянок поля на яких проводяться роботи. Крім того, виділяються межі недавно проведених робіт, особливо це видно на рис. 6, б, в, де 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 зображення візуально проявляється тільки межа з різним типом поверхні (див. рис. 2, г, д). На рис. 6, г, д виділяються ділянки поля, на яких роботи ще не закінчені, тобто виділяються локальні аномалії поля. ПФР космічного знімка після завершення польових робіт (рис. 6, є) також дає можливість оцінити зміни структури поля. Так на ПФР проявляються ділянки поля з різними значеннями ФР, які характеризують різний тип підстильної поверхні обумовлений якістю проведення польових робіт (на вихідних космічних зображення вони майже не проявляються (див. рис. 2, з).

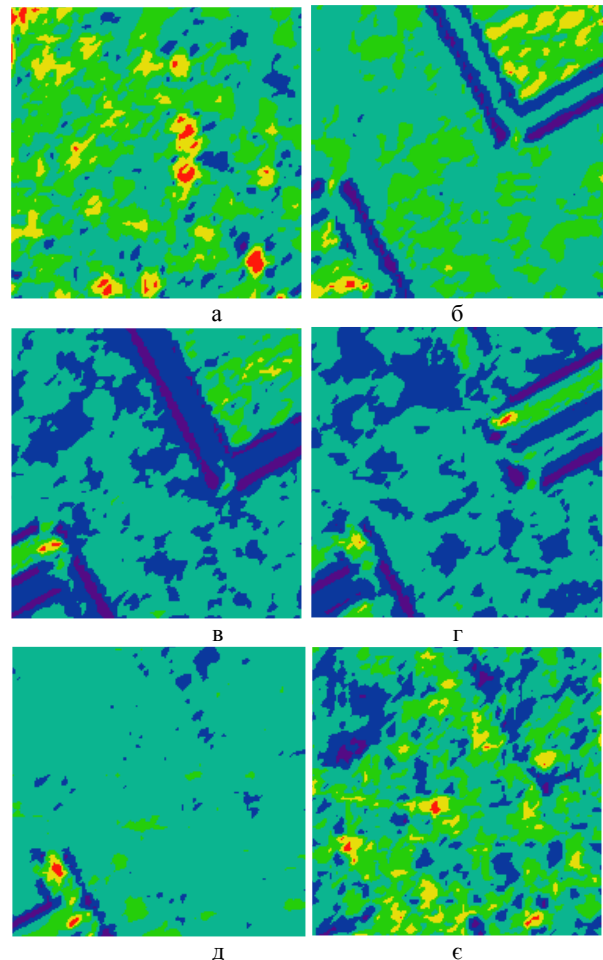


Рис. 6. ПФР космічних знімків з полем кукурудзи на якому проводилися польові роботи, станом на: 29.06.18 (а); 29.07.18 (б); 05.08.18 (в); 08.08.18 (г); 10.08.18 (д); 18.08.18 (є)

Таким чином, розрахунок та візуалізація ПФР космічних знімків сільськогосподарських земель дозволяє здійснювати їх сегментацію і виділяти межі проведених польових робіт, зміну їх у часі та оцінювати їх структуру після завершення робіт.

Крім фрактального аналізу космічних зображень за допомогою побудови і візуалізації ПФР, за допомогою різночасових космічних знімків і розрахунку їх ФР можна здійснювати моніторинг початку і закінчення польових робіт за величиною ФР. Як зазначалося вище, величини ФР залежать від складності (порізаності) перепадів яскравості зображення, тому зміна величини ФР може бути використана для виявлення зміни стану поля. Для розрахунку ФР космічних знімків сільськогосподарських земель використовувався програмний комплекс фрактального аналізу зображень, який докладно описаний у роботі [11]. Даний комплекс дозволяє аналізувати зображення у градаціях сірого (у форматі *.bmp) з використанням «ковзаючого» і «стрибаючого» «вікна» в яких розраховується ФР методом покриття. Крім того, передбачена можливість побудови гістограми ПФР, її аналіз і побудова селективних зображень вибраного діапазону ФР. Також у програмному комплексі реалізована можливість визначення мінімального і максимального значення ФР, а також

розрахунку середнього значення ФР на ПФР. За допомогою програмного комплексу були визначені ФР космічних знімків сільськогосподарських земель у літній період 2018 року (з 01.06.18 до 28.08.18).

На рис. 7, а-г наведено результати розрахунку мінімальних ФР (а), максимальних ФР (б), середніх ФР (в) і різниць ФР (г) космічних знімків з полем 1 кукурудзи на якому проводилися польові роботи. Суцільною лінією позначені ФР, що розраховувалися у «вікні» 4×4 пікселя, штриховою – у «вікні» 16×16 пікселя, штрих-пунктирною – 32×32 пікселя.

Як видно з аналізу даних, наведених на рис. 7, всі величини ФР, що визначалися під час фрактального аналізу змін стану поля, мають свої особливості. Так мінімальні ФР (рис. 7, а) найбільш чутливі до змін стану земної поверхні.

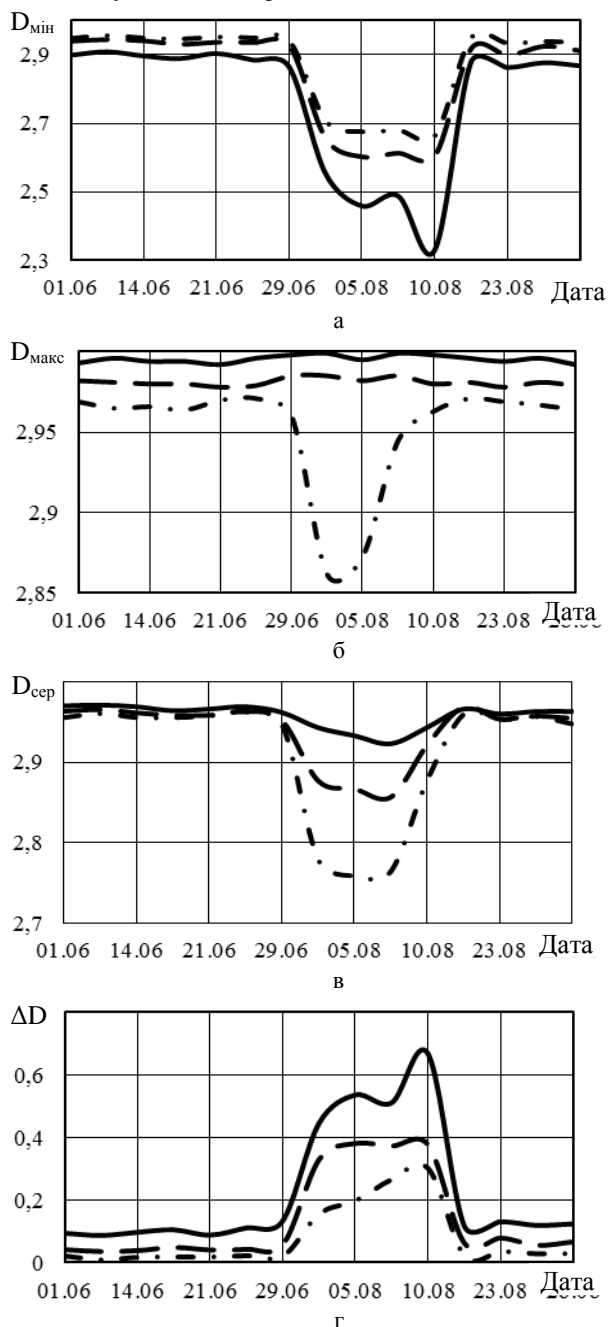


Рис. 7. Зміни мінімальних ФР (а), максимальних ФР (б), середніх ФР (в) і різниць ФР (г) космічних знімків з полем кукурудзи на якому проводилися польові роботи

Так до початку польових робіт мінімальні ФР коливаються близько 2,9 для «вікна» 4×4 пікселя і близько 2,95 для «вікон» 16×16 і 32×32 пікселя, а з початком робіт 29.07.18 мінімальні ФР зменшуються до значень $D_{\min 4 \times 4} = 2,554$, $D_{\min 16 \times 16} = 2,654$ і $D_{\min 32 \times 32} = 2,706$. Під час проведення робіт мінімальні ФР для «вікон» 16×16 і 32×32 пікселя змінюються не значно і коливаються близько 2,6 і 2,68, відповідно. Використання «вікна» 4×4 пікселя дозволяє досліджувати стан проведення польових робіт, так станом на 05.08.18 і 08.08.18 мінімальні ФР відрізняються не значно і близькі до значення 2,5, станом на 10.08.18 спостерігається найменше мінімальне ФР – $D_{\min 4 \times 4} = 2,33$. Після закінчення польових робіт мінімальні ФР знову зростають і коливаються близько 2,87 для «вікна» 4×4 пікселя і близько 2,92 для «вікон» 16×16 і 32×32 пікселя.

Таким чином, під час зміни стану сільськогосподарських земель, обумовлених польовими роботами, спостерігається зменшення мінімальних ФР, при цьому використання «вікна» розміром 4×4 пікселя найбільш придатне для аналізу ходу проведення польових робіт.

Використання максимальних ФР для аналізу зміни стану поля (рис. 7, б) є менш інформативним, але використання «вікон» рівних 32×32 пікселя і більше дозволяє визначити початок польових робіт, так станом на 29.07.18 і 05.08.18 максимальні ФР дорівнюють $D_{\max 29.07} = 2,862$ і $D_{\max 05.08} = 2,873$, відповідно, тобто вони знижуються. Необхідно зазначити, що станом на 08.08.18 і 10.08.18, коли роботи ще тривали, максимальні ФР були на рівні максимальних ФР без робіт на полі. До початку і після закінчення польових робіт максимальні ФР у «вікні» 32×32 пікселя коливаються на рівні близькому 2,7. Максимальні ФР при використанні менших «вікон» 4×4 і 16×16 пікселя не змінюються під час проведення польових робіт і на всьому інтервалі спостережень коливаються близько значень 2,99 і 2,98, відповідно.

Таким чином, використання максимальних ФР для аналізу зміни стану сільськогосподарських земель можливе тільки під час застосування «вікон» рівних 32×32 пікселя і більше, використання менших «вікон» не інформативно. Але одночасне зменшення мінімальних і максимальних ФР може характеризувати наявність на полі великих аномалій (розмір яких вище розміру «вікна» в якому спостерігається зменшення максимальних ФР), а зменшення мінімальних ФР і незмінність максимальних ФР може характеризувати наявність на полі невеликих аномалій (розмір яких менше розміру «вікна» в якому спостерігається зменшення мінімальних ФР).

Середні значення ФР (рис. 7, в) є інформативними для аналізу зміни стану поля, якщо використовуються «вікна» розміром більше 16×16 пікселя. До початку і після закінчення польових робіт середні ФР для всіх «вікон» коливаються на рівні близькому 2,96. Початку польових робіт відповідають наступні середні ФР: $D_{ср 4 \times 4} = 2,943$, $D_{ср 16 \times 16} = 2,877$ і $D_{ср 32 \times 32} = 2,779$. Під час проведення робіт середні ФР змінюються не значно, найбільше зниження середніх ФР спостерігається під час завершення робіт,

станом на 08.08.18. Таким чином, використання середніх ФР дозволяє аналізувати зміни стану сільськогосподарських земель тільки під час застосування «вікон» розміром більше 16×16 пікселів. Визначити характер проведених польових робіт за середніми значеннями ФР важко.

Поряд з мінімальними ФР, чутливими до змін стану земної поверхні є різниці ФР $\Delta D = D_{\max} - D_{\min}$ (рис. 7, г). Так до початку польових робіт різниці ФР складають менше 0,1 для «вікна» 4×4 пікселя та менше 0,05 і 0,025 для «вікон» 16×16 і 32×32 пікселя, відповідно, а після завершення робіт різниці ФР складають менше 0,13 для «вікна» 4×4 пікселя та менше 0,08 і 0,03 для «вікон» 16×16 і 32×32 пікселя, відповідно. Під час проведення польових робіт різниці ФР збільшуються із зменшенням розміру «вікна» і досягають найбільших значень 10.08.18 $\Delta D_{4 \times 4} = 0,668$, $\Delta D_{16 \times 16} = 0,376$ і $\Delta D_{32 \times 32} = 0,3$. Нерівномірне збільшення різниць ФР під час проведення робіт може характеризувати їх обсяг (площу обробленого поля). Особливо це проявляється під час застосування невеликого «вікна» 4×4 пікселя і великого «вікна» 32×32 пікселя, для «вікон» середнього розміру різниця ФР на протязі проведення робіт практично не змінюється. Таким чином, різниця ФР у «вікні» розміром 4×4 пікселя дозволяє здійснювати моніторинг змін стану сільськогосподарських земель.

У табл. 1 наведені величини ФР під час обробки цілих космічних знімків з полем 1 засіяним кукурудзою на якому проводилися польові роботи, тобто використовувалося «вікно» розміром 56×56 . Як видно з аналізу даних табл. 1, ФР цілого космічного знімку також дозволяє визначити зміну стану земної поверхні під час проведення польових робіт, яка проявляється у зменшенні величин ФР, а різні величини ФР при цьому дозволяють оцінювати їх обсяг.

Також з даних табл. 1 видно, що величини ФР поля засіяного кукурудзою у червні будуть вище у порівнянні з ФР зораного поля у кінці серпня, але не значно (відмінність у другому знаку після коми).

Таблиця 1 – Фрактальні розмірності цілих космічних знімків з полем 1 засіяним кукурудзою

Дата	D	Дата	D
01.06.18	2,958	05.08.18	2,792
04.06.18	2,965	08.08.18	2,737
14.06.18	2,965	10.08.18	2,690
16.06.18	2,957	18.08.18	2,956
21.06.18	2,959	23.08.18	2,942
26.06.18	2,953	25.08.18	2,946
29.06.18	2,947	28.08.18	2,943
29.07.18	2,801		

Таким чином, під час фрактального аналізу космічних знімків супутника Sentinel-2 для оцінки змін стану сільськогосподарських земель доцільно використовувати мінімальні ФР (зменшення ФР) або різниці ФР (збільшення різниць) у «вікні» розміром 4×4 пікселя. Розрахунок ФР у «вікнах» різно-

го розміру і одночасне застосування мінімальних і максимальних ФР дозволяє оцінити розміри аномалій на полі (ходу проведення польових робіт).

Проведемо фрактальний аналіз космічних знімків з полями 2-4, елементи яких наведено на рис. 3-5. Під час розрахунків будемо використовувати «вікно» розміром 4×4 пікселя.

На рис. 8 наведено результати розрахунку мінімальних ФР космічних знімків з полем 2 засіяним кукурудзою та хмарами над ним, елементи яких наведені на рис. 3.

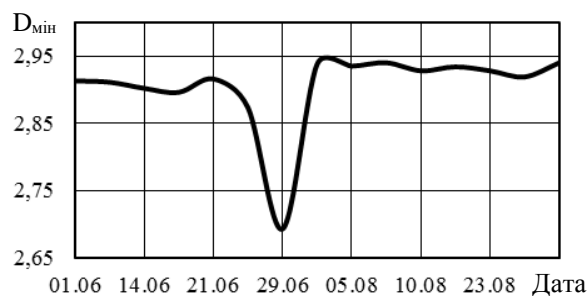


Рис. 8. Зміни мінімальних ФР космічних знімків з полем кукурудзи та хмарами над ним

Як видно на рис. 8 поява над полем хмар 29.06.18 приводить до зменшення мінімальної ФР, але величина зменшення ФР буде менше ніж під час аналізу космічного знімку поля на якому проводяться польові роботи. Так різниця ФР космічного знімку поля з хмарами складає $\Delta D_2 = 0,3$, а різниця ФР під час проведення польових робіт дорівнює $\Delta D_1 = 0,667$ (див. рис. 7, г), тобто у 2,22 рази менше. Таким чином, використання мінімальних ФР або різниць ФР дозволяє виявляти зміну структури космічного зображення, яке обумовлено дією природних явищ (хмар).

На рис. 9 наведено результати розрахунку мінімальних ФР космічних знімків з полем 3 засіяним соняшником та тіні хмар на ньому, елементи яких наведені на рис. 4. З аналізу даних на рис. 9 видно, що поява на космічному знімку 04.06.18 тіні від хмар призводить до зменшення мінімальної ФР. Але різниця ФР космічного знімку поля з тіною ($\Delta D_3 = 0,481$) у 1,6 разів більша порівняно з різницею ФР космічного знімку поля з хмарами ($\Delta D_2 = 0,3$) і у 1,39 разів менше порівняно з різницею ФР космічного знімку поля під час проведення польових робіт ($\Delta D_1 = 0,667$).

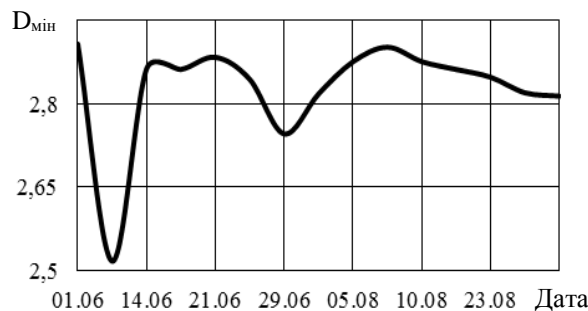


Рис. 9. Зміни мінімальних ФР космічних знімків з полем соняшника та тіні хмар на ньому

Таким чином, мінімальна ФР космічного знімку поля з тіню відрізняється від мінімальних ФР інших антропогенних і природних явищ, що дозволяє здійснювати їх розрізнення.

На рис. 10 наведено результати розрахунку мінімальних ФР космічних знімків з полем 4 засіяним ячменем на якому проводилися польові роботи, елементи яких наведені на рис. 5. Цей випадок аналогічний аналізу поля 1 засіяного кукурудзою, але протяжність польових робіт різна та інший тип культури, яка оброблялася.

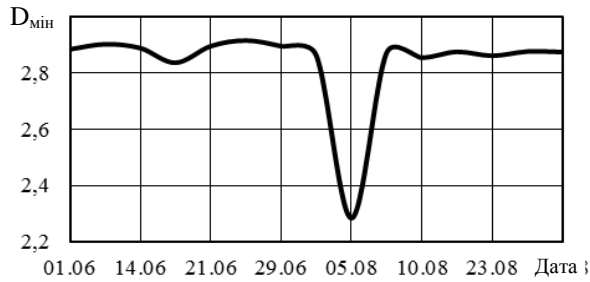


Рис. 10. Зміни мінімальних ФР космічних знімків з полем ячменю на якому проводилися польові роботи

На рис. 10 видно, що 05.08.18 спостерігається зменшення мінімальної ФР на космічному знімку, що свідчить про зміну стану поля. При цьому різниця ФР складає $\Delta D_4 = 0,715$, що близько до різниці ФР космічного знімку поля з кукурудзою під час проведення польових робіт ($\Delta D_1 = 0,667$) і відрізняється від різниці ФР космічних знімків поля з хмарами і поля з тіню від хмар. Тобто можна сказати, що зміна стану поля обумовлена проведенням польових робіт. Таким чином, фрактальний аналіз дозволяє визначити космічні знімки з аномальними ділянками на них і розрізнити чинники, що на них впливають.

Для автоматизованого розділення (сегментації) різних структур на космічному зображенні може бути побудована гістограма розрахованого ПФР і створені селективні зображення (зображення, на яких відображаються елементи, які відповідають заданому діапазону ФР). На рис. 11 наведено гістограму ПФР космічного знімку з полем кукурудзи на якому проводилися польові роботи, станом на 29.07.18, який показано на рис. 2, г. По осі абсцис відкладені значення ФР, які є на ПФР, а по осі ординат – частота появи ФР на ПФР.

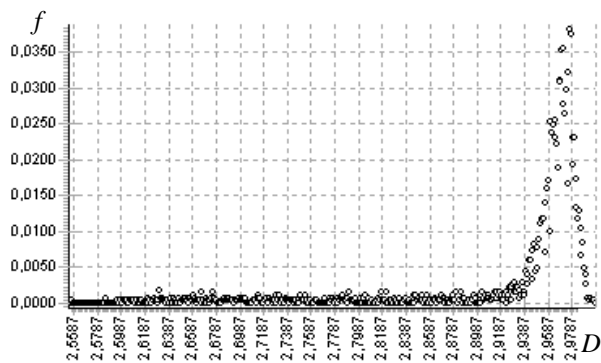


Рис. 11. Гістограма ПФР космічного знімку з полем кукурудзи на якому проводилися польові роботи, станом на 29.07.18

Як видно на рис. 11, на гістограмі ліворуч є довгий «хвіст», який тягнеться від значень ФР 2,54 до 2,92, а праворуч у діапазоні від 2,92 до 2,999 існує пік гістограми, де згрупована більша кількість значень ФР. Побудуємо селективні зображення цих двох діапазонів ФР.

Під час створення селективних зображень координати всіх «вікон» із значеннями ФР в них зберігаються у пам'яті комп'ютера. Після завдання діапазону зміни ФР, на початковому зображенні відображаються «вікна» в яких ФР входять в заданий діапазон. На рис. 12 наведено селективні зображення космічного знімку з полем кукурудзи на якому проводилися польові роботи, станом на 29.07.18:

$$D = 2,54 - 2,92 \text{ (а); } D = 2,92 - 2,999 \text{ (б).}$$

Як видно на рис. 12, першому діапазону гістограми ПФР відповідають межі ділянок поля на яких проводилися роботи, а другому діапазону – безпосередньо самі ділянки. Аналіз селективного зображення другого діапазону також дозволяє визначити (опосередковано) межі цих ділянок. Для дослідження фрактальної структури самих ділянок поля доцільно звужувати початковий діапазон $D = 2,92 - 2,999$ піку гістограми, наприклад, побудувати селективні зображення для діапазонів $D = 2,92 - 2,93$, $D = 2,92 - 2,93$ і т. д., а потім – для діапазонів $D = 2,921 - 2,922$, $D = 2,922 - 2,923$ і т. д.

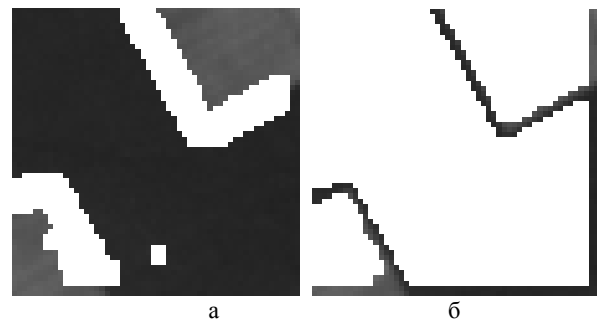


Рис. 12. Селективні зображення космічного знімку з полем кукурудзи на якому проводилися польові роботи станом на 29.07.18: $D = 2,54 - 2,92$ (а); $D = 2,92 - 2,999$ (б)

Таким чином, побудова селективних зображень дозволяє визначати межі аномальних ділянок на полі і аналізувати складність початкового зображення.

Метод моніторингу змін стану сільськогосподарських земель

Проведені вище дослідження дозволяють запропонувати метод моніторингу змін стану сільськогосподарських земель з використанням фрактального аналізу, спрощена схема якого показана на рис. 13.

Як видно на рис. 13, на перших двох етапах визначаються об'єкти дослідження. На першому – отримуються космічні знімки супутника Sentinel-2 заданої території з мережі Інтернет, наприклад з сервісу Copernicus Open Access Hub, який підтримується Європейським Космічним Агенством [4, 5].



Рис. 13. Спрощена схема методу моніторингу змін стану сільськогосподарських земель з використанням фрактального аналізу

На другому етапі здійснюється вибір сільськогосподарських земель (полів), які необхідно досліджувати. Ці поля визначаються замовником, а користувач знаходить їх візуально на космічному знімку і після виявлення проводить вирізання зображень полів заданого розміру. Для дослідження змін стану земель користувач створює базу різночасових космічних знімків вибраних полів, яка зберігається у постійній пам'яті комп'ютера.

На третьому етапі вибирається розмір «вікна», яке буде брати участь у побудові ПФР, а також величина «стрибка» (якщо крок переміщення «вікна» дорівнює 1, то «вікно» є «ковзаючим», а якщо крок більше 1 – «стрибаючим»). Розмір «вікна» вибирається у залежності від структури і розміру зображення, а збільшення величини «стрибка» підвищує швидкість обробки зображення (побудови ПФР). Більш докладно підхід до вибору цих параметрів наведено у роботі [11].

На четвертому етапі розраховується поле фрактальних розмірностей (ПФР), при цьому визначення величин ФР доцільно проводити з використанням, або методу покриття [14], або методу призми [15].

Розраховані значення ФР з координатами «вікон», в яких вони визначалися, зберігаються у пам'яті комп'ютера. Побудова ПФР є основою фрактального аналізу.

На п'ятому етапі проводиться візуалізація ПФР з подальшим його аналізом. Під час візуалізації ПФР вибирається кількість рівнів розбиття діапазону змін величин ФР на ПФР. Кожен з рівнів позначається певним кольором або градацією сірого. За рахунок цього здійснюється сегментація змін стану земель. Візуальний аналіз ПФР дозволяє визначити межі аномалій на зображенні (проведених робіт, впливу природних чинників та ін.).

На шостому етапі з використанням серії космічних знімків для яких розраховуються середні ФР, мінімальні ФР, максимальні ФР та їх різниці, визначається початок зміни стану земель, обсяг проведених робіт, їх тривалість та аналізуються аномалії на знімку, що викликані природними або антропогенними чинниками.

Побудова і аналіз гістограми ПФР на сьомому етапі дозволяє визначити розподіл ФР на ПФР (частоту появи) і характерні діапазони змін ФР, а створення селективних зображень – визначити межі аномалій на космічному знімку (проведених робіт та ін.) і оцінити структуру земель на різних ділянках поля.

На завершальному (восьмому) етапі проводиться узагальнення результатів моніторингу змін стану сільськогосподарських земель. При цьому об'єднуються всі дані, що були отримані під час фрактального аналізу: візуалізація ПФР, середні ФР, мінімальні ФР, максимальні ФР, різниці ФР, селективні зображення.

Таким чином, застосування розробленого методу дозволяє здійснювати моніторинг змін стану сільськогосподарських земель.

Висновки

Відсутність загальних підходів до оцінки стану сільськогосподарських земель за даними ДЗЗ показує, що задача моніторингу змін їх стану є актуальною і до кінця не вирішеною.

Для моніторингу змін стану сільськогосподарських земель може застосовуватися фрактальний аналіз космічних знімків супутника Sentinel-2, які є у вільному доступі у мережі Інтернет.

Основою фрактального аналізу космічних (цифрових) зображень є побудова поля фрактальних розмірностей, 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.

Розрахунок і візуалізація ПФР космічних знімків сільськогосподарських земель дозволяє здійснювати їх сегментацію і виділяти межі проведених польових робіт, зміну їх у часі та оцінювати їх структуру після завершення робіт.

Визначено, що під час фрактального аналізу космічних знімків супутника Sentinel-2 для оцінки змін стану сільськогосподарських земель доцільно

використовувати мінімальні ФР або різниці ФР під час обробки зображення «вікном» розміром 4×4 пікселя. Зменшення мінімальних ФР або збільшення різниці ФР є ознакою наявності аномального явища на космічному знімку. Розрахунок ФР у «вікнах» різного розміру і одночасне застосування мінімальних і максимальних ФР дозволяє оцінити розміри аномалій на полі.

Показано, що мінімальні ФР і різниці ФР космічних знімків полів на яких наявні аномалії, що обумовлені різними антропогенними і природними чинниками, мають різні значення, що дозволяє здійснювати їх розрізнення.

Для визначення меж аномальних ділянок на полях і аналізу складності космічного зображення

також можна застосовувати гістограму ПФР і побудовані з її допомогою селективні зображення, що дозволяє автоматизувати процес сегментації різних структур на космічному знімку.

Запропоновано метод моніторингу змін стану сільськогосподарських земель з використанням фрактального аналізу, який дозволяє визначати межі аномалій на зображенні (проведених робіт, впливу природних чинників та ін.), початок зміни стану земель, обсяг проведених робіт та їх тривалість, а також оцінювати структуру земель на різних ділянках поля.

Під час подальших досліджень, доцільно здійснити фрактальний аналіз інших каналів космічних знімків Sentinel-2 і зображень полів різних розмірів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Токарева О.С. Обработка и интерпретация данных дистанционного зондирования Земли / О.С. Токарева. – Томск: Томский политехнический университет. – 2010. – 148 с.
2. Агроекологічний супутниковий моніторинг / Тараріко О.Г., Сиротенко О.В., Ільєнко Т.В., Кучма Т.Л. – К.: Аграр. наука, 2019. – 204 с.
3. Кашкин В.Б. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений / Кашкин В.Б., Сухинин А.И. – М.: Логос, 2001. – 264 с.
4. 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> – 03.07.2021 р.
5. ESA Sentinel Online, Spatial Resolution [Електронний ресурс] / ESA Sentinel Online. – Режим доступу: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/resolutions/spatial> – 07.07.2021 р.
6. Черепанов А.С. Вегетационные индексы / А.С. Черепанов // ГЕОМАТИКА. – 2011. – № 2(11). – С. 98 – 102.
7. Моніторинг сільськогосподарських культур із застосуванням космічних знімків SENTINEL-2 / Марюшко М.В., Пашенко Р.Е., Коблюк Н.С. // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2019. – №1(89). – С. 99 – 108.
8. Слободяник М.П. Прогнозування врожайності сільськогосподарських культур за матеріалами ДЗЗ та вегетаційними індексами / М.П. Слободяник // Вісник геодезії та картографії. – 2014. – № 6 (93). – С. 16 – 20.
9. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений / Р.А. Шовенгердт. – М.: Техносфера. – 2013. – 592 с.
10. Федер Е. Фракталы / Е. Федер – М.: Мир, 1991. – 254 с.
11. Фрактальный анализ процессов структур и сигналов / [Доля Г.Н., Іванов В.К., Пашенко Р.Э. и др.]; Под. ред. Р.Э. Пашенко. – Харьков: "НЭО Экоперспектива", 2006. – 348 с.
12. Analysis of the Earth's Surface Type in Remote Sensing Using Fractal Dimension / R. Pashchenko, M. Mariushko // 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW), MRRS-2020. – 2020. – pp. 1-4. doi: 10.1109/ukrmw49653.2020.9252811.
13. Марюшко М.В. Фрактальный анализ космических снимков SENTINEL-2 для мониторингу сільськогосподарських культур / Марюшко М.В., Пашенко Р.Е. // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2020. – №4(96). – С. 34 – 47.
14. Кроновер, Р.М. Фракталы и хаос в динамических системах / Р.М. Кроновер. – М.: Постмаркет, 2000. – 352 с.
15. Clarke K. C. Computation of the Fractal Dimension of Topographic Surface Using the Triangular Prism Surface Area Method // Computers & Geosciences. – 1986. – v. 12, no. 5. – P. 713 – 722.

Received (Надійшла) 30.07.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 25.08.2021

Monitoring changes of agricultural lands condition according to fractal analysis of space imagery

R. Pashchenko, M. Mariushko

Abstract. Absence of the general going near the estimation of agricultural lands condition from remote sensing data shows that a task monitoring of their condition changes is not decided to the end. In the study possibility use fractal analysis of space imagery satellite Sentinel-2 agricultural lands are considered for determination changes their condition due to different factors. The descriptions of the Sentinel-2 space imagery for the given territory with agricultural fields on them are estimated. The order construction of the field fractal dimensions (FFD) and calculation of fractal dimension is resulted with the use methods which more frequent all apply practice for digital images analysis are methods of coverage and prism. Showed that a calculation and visualization of agricultural lands space imagery FFD allows to carry out their segmentation and select the limits of conducted field works, time-history of them and to estimate their structure after finish of works. Certainly, that during space imagery satellite Sentinel-2 fractal analysis it is expedient to use minimum or differences of fractal dimensions. Showed that for automation of process segmentation different structures on a space imagery it is possible to apply the histogram of FFD and selective images. The method monitoring changes of agricultural lands condition is offered with the use fractal analysis which allows to determine the anomalies limits on the image, beginning change of the lands condition, volume of the conducted works and time-history of them, and also to estimate the lands structure.

Keywords: monitoring the condition of agricultural lands, space imagery, fractal analysis, fractal dimension.