

Р. Е. Пашенко¹, М. В. Марюшко²

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

² Національний аерокосмічний університет імені М.С. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна

ОЦІНКА СТАНУ РІЗНИХ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР З ВИКОРИСТАННЯМ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛІЗУ

Анотація. Відсутність загальних підходів до оцінки стану сільськогосподарських культур за даними ДЗЗ показує, що задача оцінки змін їх стану є до кінця не вирішеною. **Предметом** дослідження є оцінка стану сільськогосподарських культур різних типів з використанням фрактального аналізу. **Об'єктом** дослідження є космічні знімки супутника Sentinel-2 сільськогосподарських культур різних типів. **Метою** є розгляд можливості використання фрактального аналізу космічних знімків сільськогосподарських культур різних типів для визначення змін їх стану. **Отримані наступні результати.** Проведена оцінка стану різних сільськогосподарських культур (кукурудзи, соняшника, пшениці, ячменя і гречки) на протязі всього періоду вегетації з використанням фрактального аналізу їх космічних знімків. Основою фрактального аналізу космічних знімків є побудова поля фрактальних розмірностей. Показано, що нормальний стан сільськогосподарських культур характеризується збільшенням середніх і мінімальних фрактальних розмірностей (ФР) на початкових фазах вегетації, досягненням найбільших значень ФР на середніх фазах вегетації і знову зменшенням ФР на пізніх фазах вегетації. Визначено, що за величиною середніх ФР можна розподілити поля, засіяні гречкою і кукурудзою та поля, засіяні соняшником, пшеницею і ячменем. Між собою поля, засіяні гречкою і кукурудзою можна розділити за тривалістю найбільших значень ФР, а поля, засіяні соняшником, пшеницею і ячменем між собою за величиною середніх ФР і тривалістю їх найбільших значень розділити практично не можливо. **Висновки.** Проведені дослідження показали, що фрактальний аналіз космічних знімків дозволяє проводити моніторинг стану сільськогосподарських культур різних типів.

Ключові слова: оцінка стану сільськогосподарських культур; космічний знімок; фрактальний аналіз; фрактальна розмірність.

Вступ

Дистанційне зондування із застосуванням даних з космічних апаратів є важливим інструментом для моніторингу стану сільськогосподарських земель [1].

Космічні знімки відрізняються від всіх інших просторових даних (топографічних карт, карт агро-виробничих груп ґрунтів та ін.) різноманітністю інформації, яку можна отримати на їх основі, більшою доступністю і актуальністю за рахунок регулярності оновлення.

Як наслідок, в останні роки з'являється все більше досліджень рослинного покриву та його окремих властивостей на основі даних ДЗЗ [2].

Різноманітні рослини відрізняються наявністю різних пігментів, вмістом води і фізичною структурою листя, що у свою чергу створює унікальний спектр поглинання сонячної енергії [3].

Залежно від фази розвитку, біологічного вигляду, стану доквілля і стану рослини, спектр змінюється у часі. Ці зміни спектру поглинання дослідники використовують для вирішення завдань оцінки стану рослинності та визначають емпіричні залежності між спектральними характеристиками та біохімічними параметрами різних рослин.

Сезонні зміни коефіцієнтів спектральної яскравості містять інформацію, яка може бути використана для аналізу розвитку рослинного покриву [4, 5].

Але під час отримання даних для такого моніторингу рослинного покриву та оцінки його стану використовується апаратура гіперспектральної зйомки [6].

До такої апаратури висуваються високі вимоги щодо її абсолютного або відносного радіометричного калібрування, яке у подальшому впливає на якість отриманих даних і на достовірність результатів їх оброблення. Все це приводить до збільшення складності і вартості апаратури отримання космічних знімків, а також до ускладнення алгоритмів їх оброблення.

Перспективним напрямком підвищення інформативності космічних знімків, які отримуються тільки в одному діапазоні хвиль, є застосування методів фрактального аналізу зображень [7, 8].

Різна складність поверхонь та рослинності приводить до різних форм цифрового зображення, складність яких можна кількісно оцінити за допомогою величини фрактальної розмірності (ФР). У роботі [9] показана можливість застосування фрактального аналізу космічних знімків супутника Sentinel-2 для оцінки стану посівів кукурудзи на різних фазах вегетації, але не розглядається питання оцінки стану інших сільськогосподарських культур, які вирощуються сільгоспвиробниками.

У зв'язку з цим представляє практичний інтерес провести аналіз величин фрактальної розмірності космічних знімків полів, засіяних іншими культурами, наприклад, соняшником, пшеницею, ячменем і гречкою, та порівняти їх з фрактальною розмірністю космічних знімків полів, засіяних кукурудзою та між собою.

Мета статті: розглянути можливість оцінки стану різних сільськогосподарських культур на протязі всього періоду вегетації з використанням фрактального аналізу їх космічних знімків.

Характеристика космічних знімків сільськогосподарських полів

Для оцінки стану різних сільськогосподарських культур на протязі всього періоду вегетації будемо використовувати космічні знімки супутника Sentinel-2, які є у вільному доступі в мережі Інтернет [10, 11]. Під час проведення оцінки було створено базу космічних знімків земель Вільхуватської сільської ради Чутівського району Полтавської області, переважну частину яких обробляє приватне сільськогосподарське підприємство «Дружба». База космічних знімків містить зображення за 2018 рік з просторовим розрізненням 10 метрів.

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

На рис. 1 для прикладу наведено космічний знімок каналу b8 супутника Sentinel-2 станом на 04.06.2018 з позначеними полями різних культур, що досліджувалися.



Рис. 1. Землі Вільхуватської сільської ради з позначеними полями різних культур, що досліджувалися
(**Fig. 1.** Earths of Vilhuvatska village soviet with the marked fields of different cultures which were explored)

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 стан цих культур неможливо.

Для подальшого дослідження змін стану сільськогосподарських культур були вибрані поля, засіяні кукурудзою (три поля, позначені на рис. 1 зеленими цифрами), соняшником (три поля, позначені на рис. 1 жовтими цифрами), озимого пшеницею (три поля, позначені на рис. 1 синіми цифрами), ячменем (три поля, позначені на рис. 1 красними цифрами) і одне поле гречкою (позначено на рис. 1 коричневою цифрою). На рис. 1 тип сільськогосподарських культур також позначено надписами.

Для фрактального аналізу змін стану різних сільськогосподарських культур з вихідних космічних знімків (які зберігаються у базі даних) було

проведене попереднє вирізання зображень однакового розміру (елементів космічних знімків) полів, вибраних для дослідження. Знімки представлені у градаціях сірого у форматі *.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. Також однакові розміри космічних знімків полів, засіяних різними культурами, забезпечують однакові умови під час фрактального аналізу. На рис. 2, а-і наведено приклади елементів космічних знімків (канал b8) полів, засіяних кукурудзою на зерно, поле 1 (а), поле 2 (б), поле 3 (в) станом на 04.06.2018; поле 1 (г), поле 2 (д), поле 3 (е) станом на 29.06.2018; поле 1 (ж), поле 2 (з), поле 3 (і) станом на 29.07.2018.

На рис. 3, а-і наведено приклади елементів космічних знімків (канал b8) полів, засіяних соняшником, поле 1 (а), поле 2 (б), поле 3 (в) станом на 04.06.2018; поле 1 (г), поле 2 (д), поле 3 (е) станом на 29.06.2018; поле 1 (ж), поле 2 (з), поле 3 (і) станом на 29.07.2018.

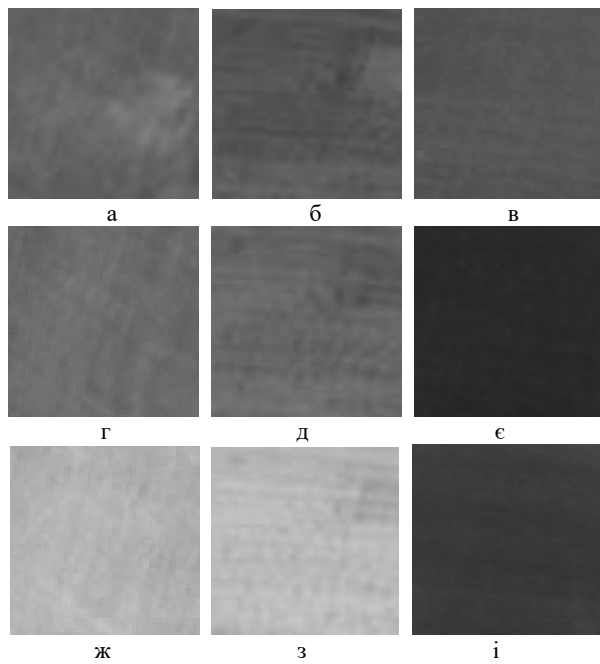


Рис. 2. Елементи космічних знімків (канал b8) полів з кукурудзою: 1 (а), 2 (б), 3 (в) станом на 04.06.2018; 1 (г), 2 (д), 3 (е) станом на 29.06.2018; 1 (ж), 2 (з), 3 (і) станом на 29.07.2018

(Fig. 2. Elements of space pictures (channel b8) of the fields with a corn: 1 (a), 2 (б), 3 (в) by the state on 04.06.2018; 1 (г), 2 (д), 3 (е) by the state on 29.06.2018; 1 (ж), 2 (з), 3 (і) by the state on 29.07.2018)

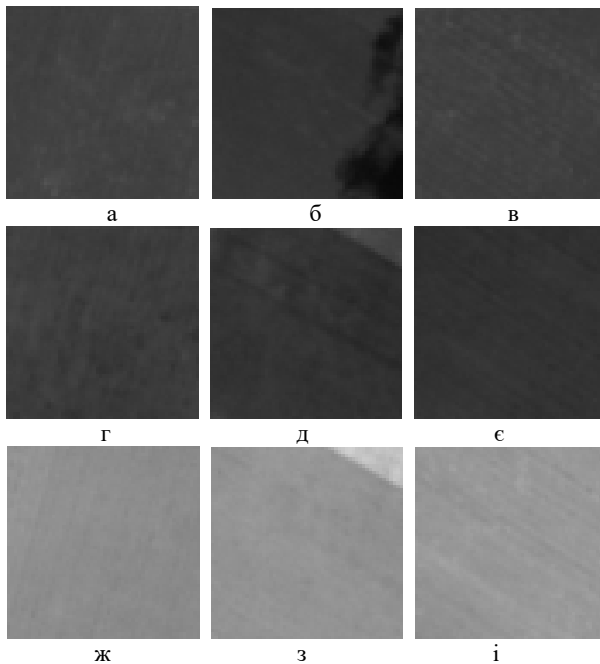


Рис. 3. Елементи космічних знімків (канал b8) полів з соняшником: 1 (а), 2 (б), 3 (в) станом на 04.06.2018; 1 (г), 2 (д), 3 (е) станом на 29.06.2018; 1 (ж), 2 (з), 3 (і) станом на 29.07.2018

(Fig. 3. Elements of space pictures (channel b8) of the fields with a sunflower: 1 (a), 2 (б), 3 (в) by the state on 04.06.2018; 1 (г), 2 (д), 3 (е) by the state on 29.06.2018; 1 (ж), 2 (з), 3 (і) by the state on 29.07.2018)

На рис. 4, а-і наведено приклади елементів космічних знімків (канал b8) полів, засіяних озимією

пшеницею, поле 1 (а), поле 2 (б), поле 3 (в) станом на 04.06.2018; поле 1 (г), поле 2 (д), поле 3 (е) станом на 29.06.2018; поле 1 (ж), поле 2 (з), поле 3 (і) станом на 29.07.2018.

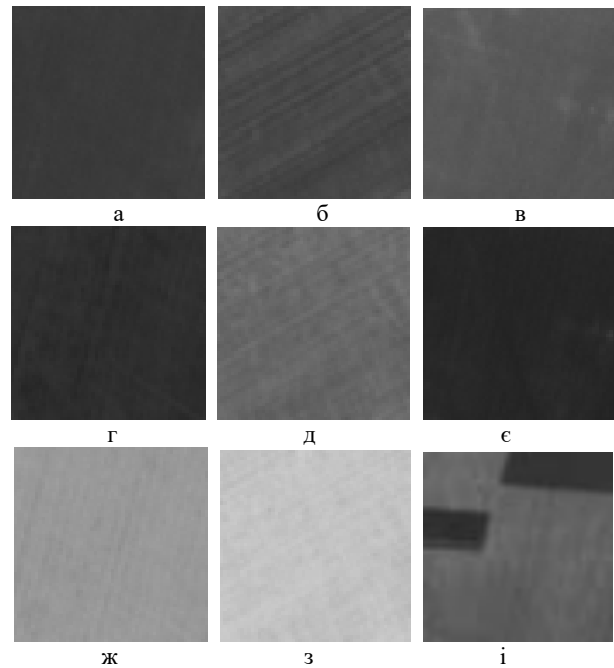


Рис. 4. Елементи космічних знімків (канал b8) полів з пшеницею: 1 (а), 2 (б), 3 (в) станом на 04.06.2018; 1 (г), 2 (д), 3 (е) станом на 29.06.2018; 1 (ж), 2 (з), 3 (і) станом на 29.07.2018

(Fig. 4. Elements of space pictures (channel b8) of the fields with a wheat: 1 (a), 2 (б), 3 (в) by the state on 04.06.2018; 1 (г), 2 (д), 3 (е) by the state on 29.06.2018; 1 (ж), 2 (з), 3 (і) by the state on 29.07.2018)

На рис. 5, а-і наведено приклади елементів космічних знімків (канал b8) полів, засіяних яровим ячменем, поле 1 (а), поле 2 (б), поле 3 (в) станом на 04.06.2018; поле 1 (г), поле 2 (д), поле 3 (е) станом на 29.06.2018; поле 1 (ж), поле 2 (з), поле 3 (і) станом на 29.07.2018.

На рис. 6, а-в наведено приклади елементів космічних знімків (канал b8) поля, засіяного гречкою, станом на 04.06.2018 (а); станом на 29.06.2018 (б); станом на 29.07.2018 (в).

Як видно з візуального аналізу елементів космічних знімків на рис. 2-6, вони відрізняються відтінками градації сірого. На різних фазах вегетації спостерігаються різні відтінки сірого, так у червні (04.06.2018; 29.06.2018) для віх типів культур градації сірого більш темні, у порівнянні з липнем (29.07.2018), де спостерігаються більш світлі відтінки. Необхідно також зазначити, на рис. 2-6 видно, що існують деякі відмінності у градаціях сірого на одну дату для полів з однією і тією ж культурою. Це може бути обумовлено відмінностями у термінах проведення посівних робіт, тому на різних полях спостерігаються відмінності у термінах розвитку посівів і, відповідно, різна градація сірого на знімках. Також зміна градацій сірого та їх нерівномірність на знімку може обумовлюватися проведенням польових робіт, як це видно на рис. 4, і.

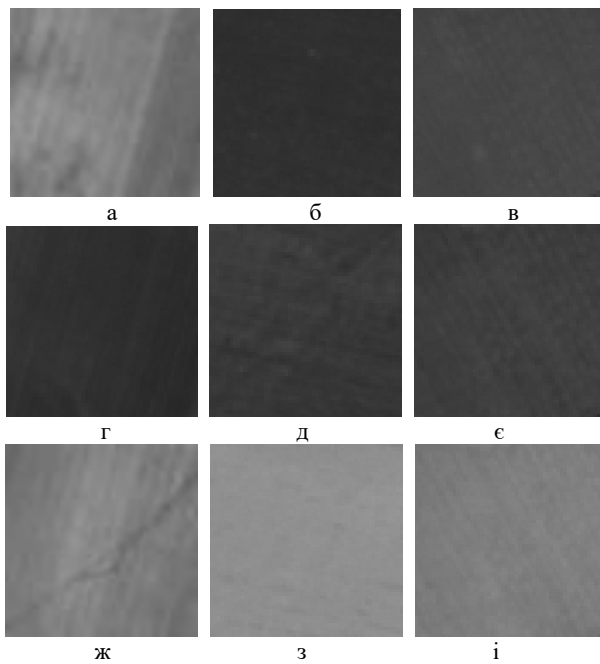


Рис. 5. Елементи космічних знімків (канал b8) полів з ячменем: 1 (а), 2 (б), 3 (в) станом на 04.06.2018; 1 (г), 2 (д), 3 (е) станом на 29.06.2018; 1 (ж), 2 (з), 3 (і) станом на 29.07.2018

(Fig. 5. Elements of space pictures (channel b8) of the fields with a barley: 1 (a), 2 (б), 3 (в) by the state on 04.06.2018; 1 (г), 2 (д), 3 (е) by the state on 29.06.2018; 1 (ж), 2 (з), 3 (і) by the state on 29.07.2018)

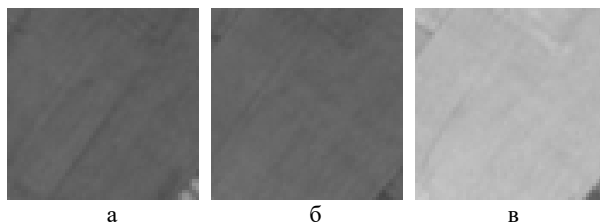


Рис. 6. Елементи космічних знімків (канал b8) поля з гречкою станом: на 04.06.2018 (а), на 29.06.2018 (б), на 29.07.2018 (в)

(Fig. 6. Elements of space pictures (channel b8) of the field with a buckwheat by the state: on 04.06.2018 (a), on 29.06.2018 (б), on 29.07.2018 (в))

Крім того, на знімках може спостерігатися зміна градацій сірого за рахунок наявності на них хмар (світлий відтінок) або тіні хмар (темний відтінок), як це видно на рис. 3, б. На більшості знімків також можна спостерігати напрямки обробки полів, які проявляються у вигляді паралельних ліній, що проходять з одного боку в інший (на різних полях ці напрямки відрізняються). Таким чином, візуальний аналіз елементів космічних знімків полів дозволяє оцінити лише однорідність посівів та проведення польових робіт, але не дозволяє кількісно оцінити зміни стану сільськогосподарських культур різних типів. Для кількісної оцінки змін стану культур на космічних знімках необхідно проводити подальшу обробку. Проведемо обробку космічних знімків супутника Sentinel-2, розглянутих вище сільськогосподарських культур, у літній період 2018 року (з 04.06.2018 до 25.08.2018) з використанням фрактального аналізу.

Оцінка змін стану сільськогосподарських культур з використанням фрактальної розмірності

Основою фрактального аналізу космічних (цифрових) знімків є побудова поля фрактальних розмірностей (ПФР). Процес побудови ПФР детально розглянуто у роботі [8]. Під час побудови ПФР проводиться сканування зображення «вікном», розміром $n \times m$ пікселів, з кроком переміщення s (при $s = 1$ «вікно» є таким, що «ковзає», а при $s > 1$ – що «стрибає»). Для кожного положення «вікна» визначається числове значення ФР у «вікні» і записується в матрицю D , яка називається «полем фрактальних розмірностей». Під час побудови ПФР розміри елемента космічного знімка складають 56×56 пікселів, а розміри «ковзаючого вікна» ($s = 1$) дорівнюють $n \times m = 32 \times 32$ пікселі. На практиці найчастіше для аналізу цифрових знімків з використанням ФР застосовують метод покриття [12], який реалізує визначення розмірності Гаусдорфа – Безиковича, яка описується виразом:

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

де ε – довжина сторони куба (максимальна довжина дорівнює розміру «вікна»), яким покривають тривимірне представлення цифрового знімка; $N(\varepsilon)$ – кількість кубів, що накривають знімок. Безпосередньо за цією формулою розрахувати ФР знімка підстильної поверхні неможливо. Порядок визначення ФР за методом покриття докладно описано у [12]. У [9] зазначалося, що найбільш інформативними під час оцінки стану сільськогосподарських культур є середні і мінімальні значення ФР. Розглянемо $D_{\text{сер}}$ і $D_{\text{мін}}$ космічних знімків трьох полів, засіяних кукурудзою на зерно, з використанням «ковзаючого вікна» розміром 32×32 пікселя, які наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Величини середніх і мінімальних значень ФР космічних знімків полів, засіяних кукурудзою

Дата	Поле 1		Поле 2		Поле 3	
	$D_{\text{мін}}$	$D_{\text{сер}}$	$D_{\text{мін}}$	$D_{\text{сер}}$	$D_{\text{мін}}$	$D_{\text{сер}}$
04.06.18	2,932	2,940	2,920	2,947	2,906	2,937
14.06.18	2,960	2,965	2,939	2,950	2,861	2,917
16.06.18	2,959	2,964	2,928	2,943	2,864	2,923
21.06.18	2,957	2,963	2,942	2,952	2,909	2,945
26.06.18	2,958	2,966	2,948	2,958	2,926	2,958
29.06.18	2,962	2,967	2,952	2,960	2,909	2,945
29.07.18	2,969	2,980	2,972	2,979	2,974	2,983
05.08.18	2,951	2,966	2,969	2,978	2,964	2,980
08.08.18	2,948	2,962	2,966	2,978	2,973	2,983
10.08.18	2,920	2,939	2,925	2,967	2,947	2,979
18.08.18	2,919	2,944	2,922	2,956	2,960	2,981
23.08.18	2,902	2,931	2,815	2,943	2,940	2,970
25.08.18	2,888	2,922	2,903	2,948	2,933	2,969

Як видно з аналізу даних у табл. 1, на початковій фазі вегетації середні і мінімальні ФР на всіх полях невеликі і починають зростати на більш пізніх фазах, досягаючи свого максимуму в кінці липня і на початку серпня. На заключних фазах вегетацій у кінці серпня середні і мінімальні ФР знову починають зменшуватися, але їх значення більші ніж на початкових фазах. Як

зазначалося у роботі [9], так само ведуть себе і індекси NDVI. У табл. 1 також видно, що на полях 1 і 2 у другій половині серпня місяця врожай було зібрано і величини ФР наближаються до значень, які були на початку червня місяця. На полі 3 найбільші значення ФР спостерігаються протягом всього серпня місяця, що може свідчити про те, що врожай на цьому полі було зібрано пізніше, ніж на полях 1 і 2. Невеликий розкид числових значень середніх і мінімальних ФР на протяжці всього періоду вегетації (різниця у другому знаку після коми) обумовлений однорідністю космічних знімків полів, що приводить до невеликої порізаності їх тривимірному представлення. Тобто ступень вегетації рослин змінює структуру космічного знімку дуже слабо, що у свою чергу приводить до відмін величин ФР у другому знаку після коми.

Проведемо оцінку стану інших сільськогосподарських культур на різних полях Вільхуватської сільської ради, за весь період вегетації у 2018 році з використанням фрактального аналізу. У табл. 2 наведено середні і мінімальні ФР космічних знімків полів, засіяних соняшником, при використанні «ковзаючого вікна» розміром 32×32 пікселя.

Таблиця 2 – Величини середніх і мінімальних значень ФР космічних знімків полів, засіяних соняшником

Дата	Поле 1		Поле 2		Поле 3	
	D_{\min}	$D_{\text{сер}}$	D_{\min}	$D_{\text{сер}}$	D_{\min}	$D_{\text{сер}}$
04.06.18	2,934	2,958	2,911	2,959	2,945	2,953
14.06.18	2,944	2,967	2,922	2,947	2,962	2,968
16.06.18	2,960	2,972	2,928	2,951	2,955	2,965
21.06.18	2,968	2,976	2,945	2,959	2,972	2,980
26.06.18	2,950	2,963	2,906	2,953	2,968	2,977
29.06.18	2,948	2,960	2,854	2,935	2,959	2,967
29.07.18	2,978	2,984	2,903	2,971	2,978	2,981
05.08.18	2,983	2,987	2,934	2,981	2,969	2,975
08.08.18	2,983	2,986	2,944	2,981	2,979	2,981
10.08.18	2,980	2,984	2,936	2,976	2,971	2,975
18.08.18	2,981	2,986	2,928	2,975	2,981	2,983
23.08.18	2,976	2,982	2,919	2,965	2,976	2,979
25.08.18	2,968	2,979	2,906	2,955	2,973	2,976

Як видно з аналізу даних у табл. 2, на початковій фазі вегетації соняшника середні і мінімальні ФР, так як і для кукурудзи, на всіх полях менші ніж на більш пізніх фазах, досягаючи свого максимуму у серпні. Якщо порівняти середні ФР полів, засіяних соняшником (табл. 2), з ФР полів, засіяних кукурудзою (табл. 1), то можна побачити, що значення середніх ФР на ранніх фазах вегетації практично однакові, а на заключних фазах – у полів, засіяних соняшником, значення середніх ФР не значно але більші ніж у полів, засіяних кукурудзою ($D_{\text{кукурудза}} = 2,980 - 2,983$ і $D_{\text{соняшник}} = 2,981 - 2,987$). Крім того, максимальні значення середніх ФР полів, засіяних соняшником, спостерігаються на тиждень пізніше (початок серпня, а не кінець липня) і продовжуються більш тривалий час у порівнянні з полями, засіяними кукурудзою. Характер змін ФР полів, засіяних соняшником, на всьому періоді вегетації такий самий, як і полів, засіяних кукурудзою. Зміна мінімальних ФР має такий же самий характер, як і зміна середніх ФР. Також необхідно зазначити, що для поля 2, засіяного соняшником, мінімальні і

середні ФР (особливо на ранніх фазах вегетації) мають менші значення порівняно з полями 1 і 3. Це обумовлено тим, що поле 2 на знімку не є однорідним, у правому верхньому куті є ділянка з іншою структурою (рис. 3, д, з), що приводить до зниження величин ФР.

Як зазначалося вище, на знімку поля 2 були наявні тіні хмар 04.06.2018 (див. рис. 3, б), але у табл. 2 04.06.2018 не спостерігаються аномальні значення середніх і мінімальних ФР для поля 2. Це обумовлено тим, що розміри «вікна» 32×32 пікселя, яке використовувалося під час аналізу, більші ніж розміри тіні хмар на космічному знімку. Аномальні значення ФР з'являються при зменшенні розмірів «вікна» до розмірів тіні хмар.

Таким чином, використання фрактального аналізу дозволяє провести оцінку стану полів, засіяних соняшником, та визначити особливості окремих з них, наприклад, впливу природних чинників на структуру космічного знімка, як це було показано для поля 2. Крім того, існують невеликі, але помітні відмінності у значеннях ФР для полів з різними сільськогосподарськими культурами (кукурудза або соняшник). У табл. 3 наведено середні і мінімальні ФР космічних знімків полів, засіяних озимою пшеницею, при використанні «ковзаючого вікна» розміром 32×32 пікселя.

Таблиця 3 – Величини середніх і мінімальних значень ФР космічних знімків полів, засіяних пшеницею

Дата	Поле 1		Поле 2		Поле 3	
	D_{\min}	$D_{\text{сер}}$	D_{\min}	$D_{\text{сер}}$	D_{\min}	$D_{\text{сер}}$
04.06.18	2,959	2,977	2,937	2,957	2,946	2,958
14.06.18	2,959	2,973	2,946	2,956	2,939	2,962
16.06.18	2,952	2,967	2,940	2,948	2,930	2,955
21.06.18	2,968	2,977	2,951	2,958	2,938	2,967
26.06.18	2,970	2,975	2,956	2,963	2,924	2,967
29.06.18	2,954	2,961	2,958	2,966	2,883	2,951
29.07.18	2,986	2,989	2,986	2,989	2,914	2,937
05.08.18	2,988	2,989	2,984	2,989	2,880	2,924
08.08.18	2,990	2,991	2,986	2,989	2,850	2,924
10.08.18	2,985	2,987	2,983	2,987	2,754	2,894
18.08.18	2,984	2,986	2,975	2,982	2,792	2,915
23.08.18	2,971	2,973	2,965	2,973	2,758	2,894
25.08.18	2,965	2,968	2,958	2,967	2,762	2,904

Як видно з аналізу даних у табл. 3, на протяжці всього періоду вегетації середні і мінімальні ФР на полях 1, 2 спочатку збільшуються і досягають свого максимуму в кінці липня і в середині серпня. В кінці серпня значення ФР знову починають зменшуватися. Такі ж залежності спостерігалися під час фрактального аналізу полів, засіяних кукурудзою і соняшником. Таким чином, така поведінка середніх і мінімальних ФР характерна для всіх сільськогосподарських культур на протяжці їх вегетації. З порівняння середніх ФР полів, засіяних пшеницею (табл. 3), та полів, засіяних кукурудзою (табл. 1) і соняшником (табл. 2), видно, що значення середніх ФР на полях, засіяних пшеницею, не значно але більше ніж у полів, засіяних соняшником, і ще більше ніж у полів, засіяних кукурудзою ($D_{\text{кукурудза}} = 2,980 - 2,983$, $D_{\text{соняшник}} = 2,981 - 2,987$ і $D_{\text{пшениця}} = 2,986 - 2,991$) Це скоріше за все обумовлено більшою відбивною здатністю і однорідністю по-

верхонь полів, засіяних пшеницею, на піку дозрівання. Також, як і для полів, засіяних соняшником, максимальні значення середніх ФР полів, засіяних пшеницею, спостерігаються на тиждень пізніше і продовжуються більш тривалий час у порівнянні з полями, засіяними кукурудзою. Крім того, для полів, засіяних пшеницею, на піку вегетації спостерігається менша відмінність між величинами середніх і мінімальних ФР ($D_{\text{сер}} - D_{\text{мін}} = 0,001 - 0,003$), у порівнянні з полями, засіяними кукурудзою і соняшником ($D_{\text{сер}} - D_{\text{мін}} = 0,004 - 0,009$). Це також може бути використано для розрізнення полів, засіяних різними культурами.

З даних у табл. 3 також видно, що на полі 3 спостерігаються аномальні значення середніх і мінімальних ФР з 29.07.2018. Наявність аномальних значень ФР свідчить про зміни структури знімка. Як видно на рис. 4, і, ці зміни обумовлені проведенням польових робіт на полі 3 і неоднорідні (аномальні) ділянки мають різні розміри. Крім того, відсутність космічних знімків на початок і середину липня 2018 року не дозволило оцінити стан поля 3 на завершальних фазах вегетації, а тільки спостерігати початкові фази і етап польових робіт.

Проведений аналіз дозволяє зробити висновок, що за величиною середніх ФР і тривалістю їх найбільших значень можна розподілити поля, засіяні кукурудзою і пшеницею, але не соняшником, для яких спостерігаються близькі значення середніх ФР і тривалість отримання їх найбільших значень. Зменшення різниці між величинами середніх і мінімальних ФР космічних знімків полів, засіяних пшеницею, на піку вегетації дозволяє розрізнити ці поля від полів, засіяних соняшником і кукурудзою. У табл. 4 наведено середні і мінімальні ФР космічних знімків полів, засіяних ячменем, при використанні «ковзаючого вікна» розміром 32×32 пікселя.

Таблиця 4 – Величини середніх і мінімальних значень ФР космічних знімків полів, засіяних ячменем

Дата	Поле 1		Поле 2		Поле 3	
	$D_{\text{мін}}$	$D_{\text{сер}}$	$D_{\text{мін}}$	$D_{\text{сер}}$	$D_{\text{мін}}$	$D_{\text{сер}}$
04.06.18	2,943	2,958	2,938	2,949	2,915	2,974
14.06.18	2,931	2,956	2,942	2,949	2,905	2,967
16.06.18	2,916	2,961	2,961	2,965	2,907	2,963
21.06.18	2,932	2,958	2,955	2,967	2,919	2,971
26.06.18	2,938	2,962	2,949	2,959	2,911	2,966
29.06.18	2,947	2,960	2,945	2,952	2,880	2,963
29.07.18	2,944	2,954	2,986	2,988	2,957	2,981
05.08.18	2,560	2,636	2,988	2,989	2,944	2,982
08.08.18	2,925	2,945	2,989	2,990	2,953	2,985
10.08.18	2,906	2,932	2,983	2,986	2,936	2,979
18.08.18	2,911	2,937	2,986	2,988	2,933	2,982
23.08.18	2,905	2,931	2,970	2,980	2,928	2,978
25.08.18	2,908	2,935	2,972	2,979	2,933	2,978

Як видно з даних табл. 4, для поля 1 стан посівів можна проаналізувати тільки на заключних фазах вегетації, коли середні і мінімальні ФР зменшуються. Після 05.08.2018 врожай на цьому полі був зібраний, а середні і мінімальні ФР мають значення, характерні для періоду до початку вегетації. У зв'язку з цим, найбільш інформативними для оцінки стану полів, засіяних ячменем, на протязі всього періоду вегетації

є космічні знімки полів 2 і 3. Аналіз даних у табл. 4 показав, що на протязі всього періоду вегетації середні і мінімальні ФР на полях 2 і 3, як і на полях, засіяних іншими культурами, спочатку збільшуються і досягають свого максимуму на початку і в середині серпня, а потім знову починають зменшуватися. Крім того, числові значення ФР для полів, засіяних пшеницею, і поля 2, засіяного ячменем, практично не відрізняються ($D_{\text{пшениця}} = 2,986 - 2,991$ і $D_{\text{ячмінь}} = 2,986 - 2,990$). Також, для цього поля на піку вегетації спостерігаються такі ж відмінності між величинами середніх і мінімальних ФР ($D_{\text{сер}} - D_{\text{мін}} = 0,001 - 0,003$), як і для полів, засіяних пшеницею. Це, скоріше за все, обумовлено практично однаковою структурою посівів пшениці і ячменя на всіх фазах вегетації. Тому розпізнати ці дві культури за величиною ФР не можливо. Середні і мінімальні ФР поля 3, засіяного ячменем, відрізняються від ФР, які були характерні для поля 2. Величини ФР поля 3 менші ніж ФР поля 2 ($D_{\text{ячмінь}2} = 2,986 - 2,990$ і $D_{\text{ячмінь}3} = 2,981 - 2,985$), що, скоріше за все, обумовлено різним станом посівів ячменя на цих полях. Посіви ячменя на полі 2 мають кращий стан, ніж на полі 3.

Порівняння середніх і мінімальних ФР полів, засіяних ячменем (табл. 4), та полів, засіяних кукурудзою (табл. 1) і соняшником (табл. 2), дозволяє зробити такі ж висновки, як і під час порівняння цих полів з полями, засіяними пшеницею (табл. 3).

Таким чином, за величиною середніх ФР і тривалістю їх найбільших значень можна розподілити поля, засіяні кукурудзою і пшеницею та ячменем, але між собою поля, засіяні пшеницею і ячменем не відрізняються, і практично не відрізняються від полів, засіяних соняшником. Однакова різниця між величинами середніх і мінімальних ФР космічних знімків полів, засіяних ячменем і пшеницею, на піку вегетації також не дозволяє розрізнити ці поля між собою. Розкид значень середніх і мінімальних ФР для різних полів, засіяних ячменем, скоріше за все, обумовлений відмінностями в термінах проведення посівних робіт і різним станом посівів ячменя на цих полях. У табл. 5 наведено середні і мінімальні ФР космічних знімків поля, засіяного гречкою, при використанні «ковзаючого вікна» розміром 32×32 пікселя.

Таблиця 5 – Величини середніх і мінімальних значень ФР космічних знімків поля, засіяного гречкою

Дата	$D_{\text{мін}}$	$D_{\text{сер}}$	Дата	$D_{\text{мін}}$	$D_{\text{сер}}$
04.06.18	2,875	2,972	05.08.18	2,978	2,982
14.06.18	2,953	2,975	08.08.18	2,966	2,982
16.06.18	2,959	2,970	10.08.18	2,964	2,976
21.06.18	2,943	2,975	18.08.18	2,954	2,971
26.06.18	2,972	2,978	23.08.18	2,940	2,960
29.06.18	2,952	2,976	25.08.18	2,932	2,953
29.07.18	2,975	2,983			

Як видно з даних у табл. 5, на протязі всього періоду вегетації середні і мінімальні ФР на полі, засіяному гречкою, як і на полях з іншими культурами, що розглядалися вище, спочатку збільшуються і досягають свого максимуму в кінці липня і в середині серпня, а потім знову зменшуються.

Числові значення ФР для поля, засіяного гречкою, близькі до величин ФР полів, засіяних кукурудзою ($D_{\text{кукурудза}} = 2,980 - 2,983$ і $D_{\text{гречка}} = 2,982 - 2,983$), але тривалість найбільших значень ФР у цього поля більше і дорівнює тривалості для полів, засіяних соняшником, пшеницею і ячменем. Також діапазон зміни середніх ФР поля, засіяного гречкою менше, ніж у полів, засіяних кукурудзою. Близькість числових значень ФР поля з гречкою і полів з кукурудзою обумовлено близькою структурою цих посівів і відрізняється від структури посівів соняшника, пшениці і ячменя. Різна тривалість найбільших значень ФР і менший діапазон зміни середніх ФР у поля, засіяного гречкою, порівняно з полями, засіяними кукурудзою, дозволяє за цими ознаками розподілити поля з цими культурами.

Порівняння середніх ФР поля, засіяного гречкою (табл. 5), і полів, засіяних ячменем (табл. 4), пшеницею (табл. 3) і соняшником (табл. 2), дозволяє зробити такі ж висновки, як і під час порівняння цих полів з полями, засіяних кукурудзою (табл. 1).

Таким чином, за величиною середніх ФР можна розподілити поля, засіяні гречкою і кукурудзою та поля, засіяні соняшником, пшеницею і ячменем. Між собою поля, засіяні гречкою і кукурудзою можна розділити за тривалістю найбільших значень ФР і різним діапазоном зміни середніх ФР.

Висновки

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

Для оцінки змін стану сільськогосподарських культур різних типів може застосовуватися фрактальний аналіз космічних знімків супутника Sentinel-2, які є у вільному доступі у мережі Інтернет. Елементи космічних знімків (канал b8) полів, засіяних різними культурами, дозволяють проводити їх візуаль-

ний аналіз, але не дозволяє кількісно оцінити зміни стану сільськогосподарських культур різних типів.

Основою фрактального аналізу космічних (цифрових) знімків є побудова поля фрактальних розмірностей, під час якого проводиться сканування зображення «вікном» заданого розміру та з заданим кроком переміщення. Для кожного положення «вікна» визначається числове значення ФР, яке записується в матрицю ФР.

Нормальний стан сільськогосподарських культур на протязі всього періоду вегетації характеризується збільшенням середніх і мінімальних ФР на початкових фазах, досягненням найбільших значень ФР на середніх фазах і знову зменшенням ФР на заключних фазах.

За величиною середніх ФР можна розподілити поля, засіяні гречкою і кукурудзою та поля, засіяні соняшником, пшеницею і ячменем. Між собою поля, засіяні гречкою і кукурудзою можна розділити за тривалістю найбільших значень ФР і різним діапазоном зміни середніх ФР, а поля, засіяні соняшником, пшеницею і ячменем між собою за величиною середніх ФР і тривалістю їх найбільших значень розділити практично не можливо. Зменшення різниці між величинами середніх і мінімальних ФР космічних знімків полів, засіяних пшеницею та ячменем, на піку вегетації дозволяє розрізнити ці поля від полів, засіяних соняшником, кукурудзою і гречкою.

Аномальне зменшення величин середніх і мінімальних ФР дозволяє здійснювати моніторинг змін стану полів, обумовлених проведенням польових робіт, або впливом на зображення природних чинників, наприклад, наявністю хмар.

Під час подальших досліджень, доцільно здійснити оцінку змін стану сільськогосподарських земель і культур різних типів із застосуванням різних розмірів «вікна» та космічних знімків інших каналів супутника Sentinel-2 під час фрактального аналізу.

REFERENCES

1. Tokareva O.S. (2010), *Treatment and interpretation the remote sensing of Earth information*, TPU, 148 p. available at: <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-obrabotka-dannyh-distancionnogo-zondirovaniya-zemli-prakticheskie-aspekty.pdf>.
2. Komarova, A.F., Zhuravleva, I.V. and Yablokov, V.M. (2016), "Open-source multispectral remote sensing data for the investigation of plant communities", *Principles of the Ecology*, Vol. 17, No 1, pp. 24-62, doi: <https://doi.org/10.15393/j1.art.2016.4922>.
3. Orlov, D.S., Suhanova, N.I. and Rozanova, M.S. (2001), *Spectral reflectivity of soils and their components*, MGU, Moscow, 176 p., available at: <https://drive.google.com/file/d/1Xn7OkdAcBzzHYb9TOE8IUqS4x3xsZOuY/view>.
4. Terehin, E.A. (2016), "Geoinformation approach to monitoring and estimation the state of sowing areas with the use satellites information (on the example of the Belgorod region)", *Scientific lists of BelSU. Series are Natural sciences*, Vol. 36, No 18(239). pp. 148-155, available at: <https://core.ac.uk/download/222447266.pdf>.
5. Spivak, L.F., Terehova, A.G., Vitkovskaj, I.S. and Batirbaeva, M.Zh. (2009), "Use of long-term satellites information of different permission for complex estimation the state of vegetable cover Kazakhstan territory", *Sovremenie problemi distancionno zondirovanij Zemli iz kosmosa*, Vol. 6, No. 2. pp. 450-458, available at: http://d33.infospace.ru/d33_conf/2009.2/450-458.pdf.
6. Shovengerdt, R.A. (2013), *Remote sensing. Models and methods of the images processing*, Tehnosfera, Moscow, 592 p., available at: <https://www.geokniga.org/books/5231>.
7. Feder, J. (1988), *Fractals*, Springer, New York US, 263 p., doi: <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-2124-6>.
8. Doly, G.N., Ivanov, V.K., Kuchuk, G.A. and Pashchenko, R.E. (2006), "Fractal analysis processes, structures and signals", *NEO Ekoperspektiva*, Kharkiv, 348 p., available at: https://scholar.google.ru/scholar?hl=ru&as_sdt=0.5&cluster=14416160122446740941.
9. Marjushko, M.V. and Pashchenko, R.E. (2020), "Fractal analysis of Sentinel-2 satellite imagery for monitoring of agricultural crops", *Radioelektronni i komp'juterni systemy*, No. 4(96), pp. 34-47, doi: <https://doi.org/10.32620/reks.2020.4.03>.
10. (2023), *Copernicus Europe's eyes on Earth, Sentinel-2*, available at: <https://www.copernicus.eu/en/about-copernicus/infrastructure/discover-our-satellites>.
11. (2023), *Spatial Resolution*, ESA Sentinel Online. available at: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/resolutions/spatial>.

12. Kronover, R.M. (1995), *Introduction to Fractals and Chaos*, Jones and Bartlett Publishers, Boston, London, 350 p., available at: <https://www.amazon.com/Introduction-Fractals-Chaos-Bartlett-Mathematics/dp/0867204648>.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Токарева О. С. Обробка та інтерпретація даних дистанційного зондування Землі. ТПУ, 2010. 148 с. URL: <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-obrabotka-dannyh-distancionnogo-zondirovaniya-zemli-prakticheskie-aspekty.pdf>.
2. Комарова А. Ф., Журавльова І. В., Яблоков В. М. Відкриті мультиспектральні дані та основні методи дистанційного зондування у вивченні рослинного покриву. *Принципи екології*. 2016. Т. 5. № 1. С. 40-71. DOI: <https://doi.org/10.15393/j1.art.2016.4922>.
3. Орлов Д. С., Суханова Н. І., Розанова М. С. Спектральна відбивна здатність ґрунтів та їх компонентів. МДУ, 2001. 176 с. URL: <https://drive.google.com/file/d/1Xn7OkdAcBzzHYb9TOE8IUqS4x3xsZOuY/view>.
4. Терьохін Е. А. Геоінформаційний підхід до моніторингу та оцінки стану посівних площ із застосуванням супутникових даних. *Наукові відомості БІЛДУ. Серія Природничі науки*. 2016. Вип. 36, № 18(239). С. 148-155. URL: <https://core.ac.uk/download/222447266.pdf>.
5. Співак Л. Ф., Терехов А. Г., Вітковська І. С., Батирбаєва М. Ж. Використання багаторічних супутникових даних різного дозволу на комплексну оцінку стану рослинного покриву території Казахстану. *Сучасні проблеми дистанційного зондування Землі з космосу*. 2009. Вип. 6, Т. 2. С. 450-458. URL: http://d33.infospace.ru/d33_conf/2009.2/450-458.pdf.
6. Шовенгердт Р.А. Дистанційне зондування. Моделі та методи обробки зображень. Техносфера, 2013. 592 с. URL: <https://www.geokniga.org/books/5231>.
7. Feder J. *Fractals*. New York: Springer US, 1988. 263 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-2124-6>.
8. Доля Г. Н., Иванов В. К., Кучук Г. А., Пащенко Р. Е. и др. Фрактальный анализ процессов, структур и сигналов / Под ред. Р.Е. Пащенко. Харьков: НЕО Екоперспектива, 2006. 348 с. URL: https://scholar.google.ru/scholar?hl=ru&as_sdt=0.5&cluster=14416160122446740941.
9. Марюшко М.В., Пащенко Р.Е. Фрактальный анализ космических снимков SENTINEL-2 для мониторинга сельскохозяйственных культур. *Радиоэлектронные и компьютерные системы*. 2020. №4(96). С. 34-47. DOI: <https://doi.org/10.32620/reks.2020.4.03>.
10. Copernicus Europe's eyes on Earth, Sentinel-2. 2023. URL: <https://www.copernicus.eu/en/about-copernicus/infrastructure/discover-our-satellites>.
11. Spatial Resolution. ESA Sentinel Online. 2023. URL: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-amsi/resolutions/spatial>.
12. Richard M. Crownover. *Introduction to Fractals and Chaos*. Boston, London: Jones and Bartlett Publishers, 1995. 350 p. URL: <https://www.amazon.com/Introduction-Fractals-Chaos-Bartlett-Mathematics/dp/0867204648>.

Received (Надійшла) 22.04.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 19.07.2023

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Пащенко Руслан Едуардович – доктор технічних наук, професор, Інститут радіофізики та електроніки імені О.Я. Усикова НАН України, Харків, Україна;

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: r.paschenko@i.ua; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-6218-0324>

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

Maksym Mariushko – Teaching Assistant of Geoinformation Technologies and Space Monitoring of the Earth Department, National Aerospace University named after N.Ye. Zhukovskiy «Kharkov Aviation Institute», Kharkov, Ukraine;

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

Estimation the state of different agricultural cultures with use fractal analysis

Ruslan Pashchenko, Maksym Mariushko

Abstract. Absence general approaches to estimation the state of agricultural cultures from Earth remote sensing (ERS) data shows that the task of estimation changes their state is not decided to the end. The **subject** of the study in the article is estimation of the state of different type agricultural cultures with use fractal analysis. The **object** of the study is the spaces pictures satellite Sentinel-2 of different type agricultural cultures. The **goal** is consideration possibility the use fractal analysis of spaces pictures of different type agricultural cultures for determination changes their state. **The following results were obtained.** Conducted estimations the state of different agricultural cultures (corn, sunflower, wheat, barley and buckwheat) during all period vegetation with the use fractal analysis their spaces pictures. Construction the field of fractals dimensions is basis fractal analysis of spaces pictures. It is showed that the normal state agricultural cultures is characterized by the increase middle and minimum fractals dimensions (FD) on the initial phases vegetation, by achievement the most values FD on the middle phases vegetation and again by diminishing FD on the late phases vegetation. It is certain that the size middle FD it is possible to distribute the fields by buckwheat and corn and the fields by sunflower, wheat and, barley. Between itself the fields by buckwheat and corn it is possible to divide on duration the most values FD, and the fields by sunflower, wheat and barley between itself to divide the size middle FD and duration their most values practically not possibly. **Conclusions.** The conducted researches showed that the fractal analysis of spaces pictures allowed to conduct monitoring the state of different type agricultural cultures.

Keywords: estimation the state of agricultural cultures; space picture; fractal analysis; fractal dimension.