

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ДЕРЖАВНА УСТАНОВА  
«НАУКОВИЙ ЦЕНТР АЕРОКОСМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗЕМЛІ  
ІНСТИТУТУ ГЕОЛОГІЧНИХ НАУК  
НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ»

**АРТЮШЕНКО МИХАЙЛО ВІТАЛІЙОВИЧ**

УДК 528.8.04: 528.854: 629.7.05

**МЕТОДИ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДАНИХ І УПРАВЛІННЯ  
АЕРОКОСМІЧНИМ ГІПЕРСПЕКТРАЛЬНИМ  
ГЕОМОНІТОРИНГОМ**

05.07.12 – Дистанційні аерокосмічні дослідження

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Київ – 2015

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Державній установі «Науковий Центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України»

**Науковий консультант:** доктор фізико-математичних наук, професор, член-кореспондент НАН України  
**Федоровський Олександр Дмитрович**,  
завідувач відділу системного аналізу  
ДУ «Науковий Центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України»

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор, член-кореспондент НАН України  
**Трофимчук Олександр Миколайович**,  
заступник директора з наукової роботи  
Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України

доктор технічних наук, професор  
**Бутенко Ольга Станіславівна**,  
професор кафедри виробництва  
радіоелектронних систем літальних апаратів  
Національного аерокосмічного університету  
ім. М.Є. Жуковського «ХАІ» МОН України

доктор технічних наук, старший науковий співробітник  
**Зелик Ярема Ігорович**,  
головний науковий співробітник відділу дистанційних методів та перспективних приладів Інституту космічних досліджень НАН України та ДКА України

Захист дисертації відбудеться " 13 " жовтня 2015 р. о 11 годині на засіданні Спеціалізованої вченої ради Д 26.162.03 Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України» за адресою: Україна, 01601, м. Київ, вул. Олеся Гончара, 55-Б.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України» (Україна, 01601, м. Київ, вул. Олеся Гончара, 55-Б)

Автореферат розіслано " 03 " вересня 2015 р.

Секретар спеціалізованої вченої ради Д 26.162.03  
кандидат технічних наук



А.О. Козлова

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Гіперспектральні аерокосмічні дослідження об'єктів земної поверхні, а також гіперспектральний моніторинг природно-техногенних процесів відкривають нові можливості для одержання практично значимих результатів у різних галузях економіки України. Вихідною інформацією для проведення таких досліджень слугують спектральні дані, що формуються в сотнях каналів гіперспектрометрів у результаті дистанційного зондування (ДЗ) Землі з літальних апаратів (ЛА) (космічних апаратів (КА) та повітряних носіїв). Поточний момент характеризується бурхливим розвитком гіперспектральних технологій дистанційного зондування Землі (ДЗЗ).

Під гіперспектральною технологією ДЗЗ слід розуміти спосіб раціональної організації часто повторюваного інформаційного процесу, який складається з гіперспектрального дистанційного зондування (ГДЗ) з наступним дешифруванням та інтерпретацією гіперспектральних даних, представлених у вигляді гіперспектральних зображень (ГСЗ) земної поверхні. Інформаційні технології ГДЗ є одним з найбільш перспективних напрямків дистанційних досліджень Землі з ЛА. Дані, отримані в результаті ГДЗ, використовуються: в інтересах фундаментальних наук про Землю, екологічного моніторингу, попередження та ліквідації наслідків природних катастроф і техногенних аварій, пошуку корисних копалин та цілої низки інших важливих народно-господарських задач. Широкому застосуванню гіперспектральних технологій перешкоджає мала кількість супутників та аероносіїв, обладнаних гіперспектрометрами, а також висока розмірність ГСЗ, складність передачі, зберігання, цифрового оброблення та інтерпретації великих обсягів інформації. Мала кількість комерційних ЛА ГДЗ є наслідком того, що інноваційний процес ГДЗ перебуває в початковій стадії розвитку.

Дані ГДЗ – це принципово новий вид інформації про земну поверхню. Ідентифікацію об'єктів та їх станів за спектральними інтенсивностями відбиття слід розглядати як завдання розпізнавання за хімічним складом та структурою матеріалів. Актуальним є створення нових методів і моделей, орієнтованих на оброблення, інтерпретацію та автоматизований аналіз цієї специфічної інформації, а також методик розв'язання природоохоронних і ресурсних задач, які розбудовуються в працях наукових шкіл академіка НАНУ Лялька В.І. та чл.-кор. НАНУ Федоровського О. Д. (ЦАКДЗ ІГН НАНУ), чл.-кор. НАНУ Трофимчука О. М.

Питання автоматизації оброблення цільової інформації на борту ЛА є вкрай актуальними через необхідність скорочення обсягів даних для зберігання та передачі інформації ГДЗ. Більшість природоохоронних та ресурсних задач формулюються як пошукові, пов'язані з виявленням локальних аномальних процесів і малорозмірних об'єктів на великих площах. Розробка методів експрес-оброблення цільової інформації на борту ЛА суттєво розширює можливості управління моніторингом і є основою для побудови адаптивних систем аерокосмічного геомоніторингу. Під адаптивними системами геомоніторингу слід розуміти системи спостереження з ЛА, які для досягнення поставленої мети автоматично змінюють алгоритм свого функціонування та свою структуру залежно від результатів спостережень. Передумовами для розвитку адаптивних систем космічного

геомоніторингу є можливість КА здійснювати перенацілювання апаратури зондування на об'єкти інтересу з одночасним перемиканням з режиму середньої розрізненості на детальне зондування. При такій постановці задачі управління та оброблення результатів спостережень повинні вирішуватися спільно. Існує великий обсяг робіт вітчизняних і зарубіжних учених із загальних питань управління аерокосмічними системами, однак методи управління носіями в режимах пошукового ГДЗ, які забезпечують наведення апаратури КА на об'єкти пошуку із задалегідь невідомими координатами залишаються мало вивченими.

Актуальність теми дисертації, яка освітлена в роботах [1–37] здобувача, обумовлена необхідністю комплексного (системного) удосконалювання інформаційних технологій гіперспектральних аерокосмічних досліджень.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана у відповідності з планами наукових досліджень:

ДУ «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України» у рамках наступних науково-дослідних тем: “Розробка системної методології розвитку та підвищення ефективності космічного геомоніторингу для вирішення задач природокористування при зростанні об'єму виконуваних тематичних задач та удосконаленні космічних систем дистанційного зондування Землі” № ДР 0108U000052; “Методи інформаційного інтегрування даних багатоспектрального аерокосмічного знімання, польової спектрометрії і геолого-геофізичних даних при вирішенні завдань дистанційного пошуку покладів корисних копалин на суходолі і морському шельфі” № ДР 0112U000702; “Розроблення методів та моделей, що розширюють функціональні можливості космічного геомоніторингу, на основі системних принципів аналізу і моделювання взаємозв'язаних просторових, спектральних та часових інформативних ознак об'єктів” № ДР 0112U004086;

Інституту космічних досліджень НАН та ДКА України – “Науково-методичний супровід Програми” № ДР 0103U003922; Інституту кібернетики ім. В.М. Глушкова НАНУ – “Розробка алгоритмів кластерних обчислень для задач супутникової інформації та сценарного аналізу космічної діяльності” за проектом “Створення та підготовка серійного виробництва ряду високопродуктивних інтелектуальних ЕОМ та спеціалізованого паралельного програмного забезпечення для розв'язання складних завдань в економіці, науці, безпеці та обороні України та інших галузях народного господарства” № ДР 0104U008936; У рамках зазначених тем здобувачем, як виконавцем, розроблено моделі, методи фрактальної і мультифрактальної сегментації даних, методики гіперспектрального аналізу.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дослідження є розроблення нових методів і математичних моделей обробки та інтерпретації результатів детального аерокосмічного гіперспектрального геомоніторингу та методів управління геомоніторингом для підвищення ефективності розв'язання природоресурсних та природоохоронних задач.

Досягнення поставленої мети вимагало розв'язання наступних основних задач:

- синтезу статистичних моделей степеневих розподілів спектральних інтенсивностей відбиття світлового потоку природними об'єктами;
- розробки методів, структурної та параметричної ідентифікації моделей степеневих розподілів за даними ГДЗ;

- визначення та обґрунтування вибору індикаторних ознак, що характеризують спектральну структуру об'єктів зондування та зміни в структурі;

- синтезу фрактальних і мультифрактальної моделей опису структури спектральних відбиттів, розробки методів ідентифікації моделей;

- проведення верифікації моделей і методів на тестових полігонах;

- розробки прикладів класифікації даних ГДЗ і методик розв'язання ресурсних задач;

- розробки методів для експрес-оброблення даних ГДЗ на борту ЛА, а також методу прецизійного управління ГДЗ за реперними орієнтирами;

*Об'єкт дослідження* – гіперспектральні інформаційні технології (процеси) аерокосмічних досліджень об'єктів природи.

*Предмет дослідження* – математичні моделі та методи для забезпечення розв'язання природоресурсних і природоохоронних задач засобами детального аерокосмічного гіперспектрального зондування.

**Методи дослідження.** Для розв'язання поставлених задач відповідно до сформульованої мети роботи застосовувалися наступні методи дослідження:

- статистичні методи (для опису розподілів гіперспектральних даних);

- методи теорії груп Лі (для ідентифікації симетрій та інваріантів спектрів відбиття, формування управління ГДЗ);

- фрактальний і мультифрактальний аналіз (для визначення структури спектрів і формування індикаторних ознак стану природних об'єктів);

- методи синтезу керуючих впливів рухливими об'єктами за відхиленням і метод функцій Ляпунова (для управління та стабілізації режимами ГДЗ);

- комп'ютерне моделювання (для оброблення статистичних даних).

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає у наступному:

1. Застосовано комплексний (системний) підхід до аналізу інформаційних технологій гіперспектрального геомоніторингу як єдиного процесу оброблення даних на борту ЛА та автоматичного управління режимами зондування.

2. Виявлено та експериментально підтверджено ефект мультифрактальної структури гіперспектральних відбиттів світлового потоку рослинами.

3. *Вперше* здійснено постановку та формалізацію задачі сегментації і класифікації даних гіперспектрального зондування природних об'єктів за інваріантами фрактальної структури спектрів і степеневих розподілів.

4. *Вперше* розроблено на основі апарату теорії груп Лі неперервно-групову модель симетрії степеневих розподілів спектральних відбиттів, а також методи ідентифікації розподілів, а саме:

- 4.1) *вперше* розроблено метод кратного подвійного інваріанта (КПІ) симетрії розподілів, обґрунтовано його застосування як індикаторної ознаки для автоматизованої сегментації та класифікації даних;

- 4.2) набув подальшого розвитку метод ідентифікації степеневих розподілів на основі побудови кумулятивної функції розподілу та ранг-частотного методу; метод застосований для обчислень КПІ за даними гіперспектрального зондування.

5. *Вперше* для аналізу та інтерпретації даних гіперспектрального зондування розроблено, верифіковано на тестових полігонах і застосовано методи фрактального аналізу, а саме:

5.1) набули подальшого розвитку клітинний метод обчислень фрактальної розмірності та розмірності Мінковського для визначень локальної структури спектрів, побудова полів фрактальних розмірностей спектральних відбиттів територій і сегментації даних ГДЗ за критерієм локальної розмірності поля;

5.2) розроблено метод оцінок фрактальних розмірностей спектрів для проведення експрес-оброблення даних у процесі зондування.

6. *Вперше* розроблено мультифрактальну модель гіперспектральних відбиттів рослинних покривів і досліджено фітоіндикаційний зв'язок варіабельності показника Ліпшиця-Гельдера з природними та техногенними аномаліями, викликаними концентрацією (покладами) природного газу та нафти.

7. Розроблено мультифрактальні методи досліджень природних об'єктів за спектрами відбиттів, а саме:

7.1) набув подальшого розвитку метод обчислень розмірностей Реньї за гіперспектральними характеристиками об'єктів зондування;

7.2) адаптовано для проведення мультифрактального аналізу гіперспектральних відбиттів метод обчислень функції фрактальних розмірностей від показника сингулярностей Ліпшиця-Гельдера.

8. Набули подальшого розвитку методи оброблення спектральної інформації на борту КА та ідентифікації об'єктів для організації адаптивного управління гіперспектральним моніторингом, а також методи стабілізації повітряних засобів ГДЗ за реперними орієнтирами.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає в підвищенні ефективності гіперспектральних технологій аерокосмічного геомоніторингу. Розроблено методи, які можуть бути використані для автоматизації процесів збору, оброблення та інтерпретації гіперспектральних даних при розв'язанні природоресурсних та природоохоронних завдань.

Для аналізу ГСЗ розроблено процедуру автоматизованої сегментації та класифікації об'єктів урболандшафтів методом КПП (верифіковано на ГСЗ м. Києва з ЕО-1 "Hyperion"); автоматизація знижує трудомісткість процесу проведення наземних завіркових робіт і підвищує вірогідність результату; метод може бути використаний для автоматизації комплексної оцінки антропогенних змін територій за ГСЗ. На основі виявленого ефекту мультифрактальної структури спектрів відбиттів рослин, розроблено та верифіковано: "Спосіб фрактальної спектрометричної фітоіндикації виявлення аномалій природного та техногенного походження" (патент № 104360, 27.01.2014, Бюл. №2), "Методика визначення поля фрактальних розмірностей і сегментації гіперспектральних зображень природних ландшафтів". Спосіб дозволяє за результатами спектрометрування рослин визначати біохімічні аномалії ділянок земної поверхні. При наявності відповідних геологічних ознак аномалії, біохімічна аномалія є індикатором покладів нафти або газу. Методика може знайти застосування при сегментації даних ГДЗ для визначення границь покладів природного газу. Методику верифіковано за даними ГДЗ Глібовського (Крим) підземного природного газового сховища та може бути

використана для виявлення витоків газу в підземних сховищах і трубопроводах; застосована при виконанні робіт ЦАКДЗ (№ ДР 0112U000702).

Результати досліджень використано й впроваджено в нижченаведених роботах, що підтверджено відповідними актами. За проектом “Створення та підготовка серійного виробництва ряду високопродуктивних інтелектуальних ЕОМ та спеціалізованого паралельного програмного забезпечення для розв'язання складних завдань в економіці, науці, безпеці та обороні України та інших галузях народного господарства” №ДР 0104U008936 розроблена для першої кластерної вітчизняної обчислювальної системи: програма “Складання розкладів зондування та обчислення максимального часу повторного огляду території” (Акт від 21.12.04, ІК ім. В.М. Глушкова НАНУ). Методи цифрового експрес-оброблення даних спектроскопії результатів досліджень для швидкоплинних процесів були використані та впроваджені: у Харківському фізико-технічному інституті (акти впровадження г/д №406-83, № 317/83), Інституті ядерних досліджень (акт про впровадження г/д № 698-87), ЕПКТБ “Стройпластик”. Впроваджена в НПО “Молния” підсистема моделювання динаміки руху об'єкту та законів управління ним на завершальному етапі (уточнений розрахунок економічного ефекту за г/д №624, 1982).

**Особистий внесок здобувача.** Всі основні результати, що виносяться на захист, отримані здобувачем особисто. В опублікованих зі співавторами наукових працях, у яких відображені основні наукові результати дисертації, конкретний внесок здобувача полягав у наступному: [1]–розробка методу фрактальної спектроскопічної фітоіндикації покладів вуглеводнів; [2]–метод визначення мультифрактальної структури біорізноманіття за космічними знімками; [3]–модифікація методів фрактальної геометрії; [4]– спосіб фрактальної спектроскопічної фітоіндикації; [5]– метод побудови інваріантів динамічних систем; [9]– методи обчислення функцій кількох змінних; [12]– оптимізація параметрів орбіт КА; [13]– оптимізація на основі генетичного методу; [14]– методи оцінок якості КС ДЗЗ; [18]– структура системи автоматичного управління ЛА за зображеннями; [19]– методи синтезу алгоритмів візуального управління.

**Апробація результатів дисертації.** Основні теоретичні та методичні положення, висновки й попередні результати дисертаційного дослідження були представлені, обговорені та отримали схвалення на: Міжнародних конференціях з автоматичного управління “Автоматика–2012”, (м. Київ, 26-28.09.2012); “Автоматика–2009”(м. Чернівці, 22-25.09.2009); “Автоматика 2000” (м. Львів, 11-15.09.2000); “Автоматика 97” (м. Черкаси, 23-28.06.1997); “Автоматика 96” (г. Севастополь, 9-14.09.1996); “Автоматика 95” (м. Львів, 26-30.09.1995); 11-й Українській конференції з космічних досліджень (м. Євпаторія, 29.08-2.09.2011); 9-й Международной конференции “Системный анализ и управление” (Евпатория, Крым, 4-11.07.2004, МАИ); Третій Українській конференції з перспективних космічних досліджень, (Кацивелі, Крим, 15-18.09.2003); Всесоюзной конференции по искусственному интеллекту, (Переславль-Залесский, 21-25 ноября 1988); First Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators (Udine, Italy, 5-8 Sep., 1973).

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 37 робіт, у тому числі: 23 наукові праці, що задовольняють вимогам до опублікування результатів дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук (11 – виконано

одноосібно, 1 – патент, 22 – у наукових періодичних виданнях України, з яких: 12 – перевидано у періодичних виданнях США, 12 – включено у наукометричну базу Scopus); 2 публікації – в інших виданнях України; 12 – у збірниках матеріалів і тез доповідей вітчизняних, закордонних конференції та симпозиуму.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, восьми розділів, висновків, списку використаних джерел (144 найменувань на 16 сторінках) і 6 додатків на 114 сторінках. Робота викладена на 447 сторінках, що містять 317 сторінок основного тексту (10 окремих сторінок зайнято рисунками і таблицями), 90 рисунків і 7 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність використання системного підходу до підвищення ефективності інформаційних технологій гіперспектральних аерокосмічних досліджень шляхом розробки нових методів автоматизації аналізу даних, та управління геомоніторингом. Визначено наукову новизну отриманих результатів дисертації, їхнє практичне значення та подано інформацію про особистий внесок здобувача, апробацію роботи, публікації, зв'язок роботи з науковими програмами.

**Перший розділ – “Гіперспектральне дистанційне зондування та інтерпретація даних; постановка проблеми досліджень”** – складається з восьми підрозділів, що присвячені теоретико-методичному аналізу наукової літератури, визначено особливості сучасних аерокосмічних систем ГДЗ, та сформульовано задачі дисертаційної роботи.

Проведено аналіз існуючих ЛА ГДЗ. У порівнянні із зондуванням з КА, більш широкого розповсюдження набуло детальне ГДЗ з повітряних носіїв. Перспективним є перехід на безпілотні ЛА (БПЛА) ГДЗ. Деталізований для проведення подальших досліджень інформаційний процес формування ГСЗ щільними гіперспектрометрами та бортовим комп'ютером за технологією “pushbroom” (рис. 1).

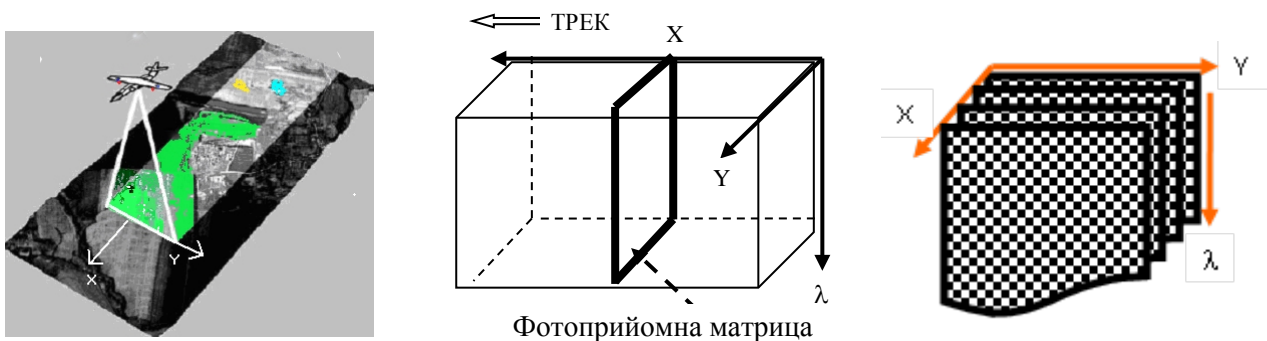


Рис. 1. Формування гіперкуба даних ГСЗ

Технологія передбачає сканування земної поверхні за рахунок руху в напрямку осі  $X$ . На рис. 2 наведено структуру даних одного кадру ГСЗ. Кадр представлений двовимірним масивом спектральних інтенсивностей – спектрометричною матрицею (СМ-матриця).

Y

Інтенсивність отраженого світлового потоку $k_{i,j}$						
№ каналу; $\lambda$ нм	№ пікселя в лінійке: $j = 1, 2, \dots, n$					
$i = 1, 2, \dots, m$	$j=1$	$j=2$	"	$j=K$	"	$j = n$
$i=1; 450$ нм	$k_{1,1}$	$k_{1,2}$	"	$k_{1,K}$	"	$k_{1,n}$
$i=2; 454$	$k_{2,1}$	$k_{2,2}$	"	$k_{2,K}$	"	$k_{2,n}$
$i=3; 458$	$k_{3,1}$	$B, B^*$		$k_{3,K}$	"	"
"	"	"	"	"	"	"
$i=K$	$k_{K,1}$	$k_{K,2}$	"	$k_{K,K}$	"	$k_{K,n}$
"	"	"	"	"	"	"
$i = m$	$k_{m,1}$	$k_{m,2}$	"	$k_{m,K}$	"	$k_{m,n}$

λ

Рис. 2. CM-матриця (кадр ГСЗ) зі спектральною розрізненістю 4 нм в процесі оброблення даних “стрибаючим вікном”  $B$

У кожний дискретний момент часу відбувається формування одного кадру ГСЗ – вузького відрізка відображення поверхні (вісь  $Y$ ), що вирізаний щілиною гіперспектрометра. Після колімуючого об'єктива світловий потік у паралельних променях потрапляє на дифракційну ґратку або призму, де відбувається розкладання потоку в спектр. Спектр проектується та фіксується на фотоприйомній матриці (див. рис.1), з якої відбувається зчитування даних кадру. ГСЗ складається із серії кадрів, має структуру тривимірного масиву  $\mathbf{k}$  – гіперкуба, який характеризується трьома індексами, кожній точці ГСЗ з координатами  $(i, j, p)$  відповідає значення спектральної інтенсивності світлового потоку:  $\mathbf{k} \in \{k_{i,j,p}\}$ ;  $i = \overline{1,m}$ ;  $j = \overline{1,n}$ ;  $p = \overline{1,s}$ .

Розглянуто питання геопозиціонування кадрів за показниками бортових вимірювальних комплексів і управління зйомкою. Система управління орієнтацією повинна забезпечити впорядкованість набору рядків (кадрів) багатомірного ГСЗ та видавати службову інформацію про геоприв'язку ГСЗ. Проаналізовано методи аналізу спектральних даних. Теорія розпізнавання типу об'єктів і матеріалів при гіперспектральних вимірюваннях впливає з фундаментальних основ спектрального аналізу – існуванні однозначних зв'язків різних хімічних (біохімічних) елементів зі спектрами їх поглинань і відбиттів. Однак для інтерпретації даних ГДЗ застосування методів спектрального аналізу в багатьох випадках не призводить до очікуваного успіху. Причина, на думку автора дисертації, полягає в тому, що при дослідженнях елементів ландшафту та рослинних покривів слід урахувувати складну структуру сумішей елементів і негладку геометрію, що відбивають світловий потік поверхонь і об'ємів, які проявляють фрактальні властивості. Через це відомий субпіксельний метод у комбінації з даними спектральних бібліотек, не призводить до бажаного результату. Стає очевидним необхідність розробки методів дешифрування даних ГДЗ із урахуванням цих факторів. Відзначається, що залучення оператора для сегментації багатовимірних ГСЗ, які нараховують кілька сотень спектральних

зображень однієї сцени, є малообґрунтованим. Найбільш обґрунтовані статистичні моделі монохроматичних зображень засновані на властивостях нормального (гаусового) розподілу та гаусових сумішей, серед яких найпоширеніший клас методів порогового оброблення. Однак, статистика розподілів яскравостей навіть монохроматичних зображень ДЗЗ високої просторової розрізненності (HR-зображення) має свою специфіку – мінливість поля яскравості однорідних об'єктів зростає та методи, засновані на різних моментах розподілів і гаусових сумішей, призводять до неповної або надлишкової сегментації. Для сегментації HR-зображень розбудовуються мультифрактальні методи сегментації. Зроблено аналітичний огляд методів спектрометричної фітоіндикації та самоорганізації рослин і рослинних покривів. Фітоіндикація, як розділ екології рослин, вивчає зв'язок ботанічних об'єктів з факторами середовища, що дозволяє здійснювати індикацію умов середовища за допомогою аналізу спектрів відбиття рослин. Зроблено висновок про те, що методи спектрометричної фітоіндикації слід розглядати як перспективні для розв'язання задач пошуку корисних копалин і характеристики екологічного стану довкілля.

Сформульовано наступні завдання. Необхідно розвинути та розробити: методи автоматизованої (автоматичної) сегментації та класифікації даних ГДЗ; математичні моделі та методики інтерпретації результатів зондування; методи експрес-оброблення цільової інформації ГДЗ на борту ЛА для побудови адаптивних систем природоохоронного та ресурсного аерокосмічного геомоніторингу.

*Математична постановка задачі сегментації даних ГДЗ.* Гіперкуб даних ГДЗ визначає для обмеженої, гладкої, відкритої області  $\Omega$  на тривимірній ґратці, складеній з пікселів та довжин хвиль (спектральних каналів)  $\Omega \in Z \times Z \times Z$  цифрову функцію спектральної яскравості  $k(\mathbf{x}) \rightarrow Z$ ,  $\mathbf{x} = (x, y, \lambda) \in \Omega$ , тобто ГСЗ. За значеннями  $k(\mathbf{x})$  необхідно визначити цифрову функцію масштабних інваріантів або фрактальних розмірностей спектральної яскравості  $D:k \rightarrow R$ , та побудувати скалярне поле розподілів інваріантів або фрактальних розмірностей на ґратці пікселів  $D(\mathbf{x}) \rightarrow R$ ,  $\mathbf{x} = (x, y) \in \Omega$ ,  $\Omega \in Z \times Z$ , де  $Z$  – множина цілих чисел,  $R$  – множина дійсних чисел. За полем інваріантів здійснити сегментацію даних, тобто визначити замкнену множину ребер  $\Gamma$  та всі зв'язні підмножини,  $\{\Omega_j\} \in \Omega \setminus \Gamma$ . За значеннями інваріантів здійснити класифікацію областей сегментації  $\{\Omega_j\}$ .

**В другому розділі** – “*Методичні основи розробки нових методів статистичного аналізу даних гіперспектрального дистанційного зондування*” – розглянуто концепцію побудови статистичних моделей спектральних відбиттів на основі степеневих розподілів і фрактальних властивостей спектрів відбиттів природних об'єктів; вводиться математичний апарат структурної та параметричної ідентифікації степеневих розподілів, методів визначення інваріантів розподілів і фрактальних, мультифрактальних структур.

Під структурою зондованої системи та структурою спектра її відбиттів слід розуміти відношення між елементами системи, абстрагуючись від фізичної, хімічної, біологічної й т.п. сутності елементів, утворюючих систему (підрозділ 2.1). У підрозділі 2.2 відзначається, що детальне ГДЗ виявляє складну структуру природних об'єктів, для яких властиві фрактальні масштабно-інваріантні структури, статистичний опис яких

відповідає степеневим розподілам. Утворення складних структур природних об'єктів пояснюється синергетичними процесами самоорганізації. Під *складністю* системи слід розуміти її принципову незвідність до простої суми своїх частин. Змістовно описати структуру такої системи неможливо за допомогою однієї або декількох мод, або декількох гармонік. Складні системи завжди є суттєво нелінійними. До них не можна як до лінійних систем застосовувати принцип суперпозиції, який передбачає розкладання системи на кілька незалежних складових, і вивчати властивості системи частинами. Степневий вид частотного розподілу спектра відбиттів посіву пшениці (рис.3) означає, що в структурі системи не можна виділити одну або кілька провідних мод і запропонувати для них вдалу інтерпретацію, необхідно розглядати весь діапазон степеневого розподілу. На рис.3 прийнято позначення:  $x$  – діапазон спектральної інтенсивності ( $0 \div 1$ ), який розбитий на 190 клас-інтервалів; в 32 дистанційних вимірюваннях сумарно задіяно 11200 спектральних каналів ( $400 \div 749$  нм, розрізненість 1 нм);  $p$  – відносна частота розподілу. У підрозділі 2.3 сформовано та обґрунтовано загальну методологію проведення досліджень дисертації, програму досліджень за напрямками і рівні досліджень структур природних об'єктів.

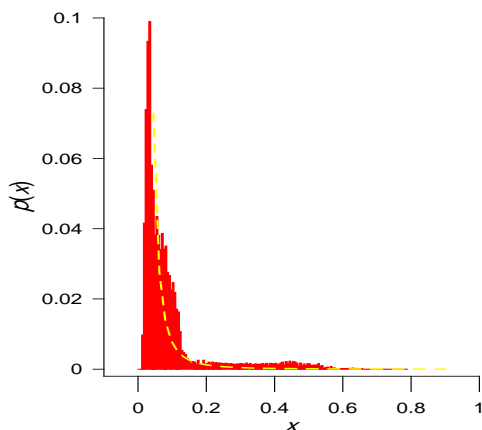


Рис.3. Гістограма спектру відбиттів

**Програма досліджень за напрямками.** Розробку та дослідження методів аналізу структури спектрів відбиттів доцільно проводити в рамках математичних моделей, кожна з яких має свою мову опису та використовує свої методи аналізу. Моделі напрямків, підтримані чисельними методами структурної та параметричної ідентифікації (див. додат. А, Б, В), верифіковані на тестових полігонах, складуть науково обґрунтоване математичне та методичне забезпечення для проведення сегментації та класифікації даних ГДЗ, інтерпретації результатів досліджень.

*Перший напрям аналізу даних ГДЗ* природних об'єктів розбудовується в рамках неперервно-групової моделі спектрів відбиттів (див. розділ 4); модель заснована на міркуваннях симетрії та інваріантів степеневих розподілів спектрів відбиттів. Під перетвореннями симетрії будь-якого об'єкта слід розуміти сукупність перетворень, в результаті яких об'єкт не змінюється. Теорія інваріантів, заснована на теорії груп Лі, забезпечить дослідження методологією та математичним апаратом для визначення найбільш загальних властивостей, характеристик і параметрів досліджуваних об'єктів, які залишаються незмінними при певних перетвореннях об'єктів.

*Другий напрям аналізу даних ГДЗ* заснований на сучасних уявленнях фрактальної геометрії, поняття якої суттєво суперечать поняттям традиційної геометрії, одним з яких є уявлення про дробові розмірності об'єктів. Цей напрямок досліджень забезпечить розробку методів для аналізу локальних структур спектрів відбиттів.

*Третій напрям досліджень* (розділи 7, 8) передбачає побудову моделі системи управління процесом збору гіперспектральних даних із процедурою аналізу даних на борту ЛА та синтезом управління стабілізацією БПЛА.

*Рівні досліджень.* Програма передбачає проведення трьох рівнів досліджень природних об'єктів за їхніми спектральними відгуками: 1) мезоскопічний, 2) макроскопічний, 3) глобальний. *Мезоскопічний рівень досліджень* – проводиться по вимірюваннях, які виконуються контактним способом спектрорадіометром ASD Fieldspec® 3FR зі спектральною розрізненністю 1 нм. Це найбільш точні спектральні вимірювання для аналізу структури та змін у структурі рослин під дією факторів середовища. Вимірювання цього рівня використовуються для завіркових робіт, визначення екологічного стану території та виявлення біохімічних аномалій, викликаних можливою глибоко залягаючою концентрацією (покладом) вуглеводнів. Дослідження цього рівня проводяться на даних з об'єктів Дніпровсько-Донецької западини, а саме: Східно-Рогинцівського, Новотроїцького родовищ вуглеводнів.

*Макроскопічний рівень досліджень* виконується на даних ДЗ приладом ASD Fieldspec® 3FR у діапазоні випромінювання 350-2500 нм, спектральною розрізненністю 1 нм, захоплення приладу становить 0,15 м поверхні зйомки, відстань до об'єктів зйомки 10 м. Об'єкт – гомогенна рослинність (пшениця), над Глібовським (Крим) виробленим родовищем газу, яке в момент зйомки експлуатувалося як підземне газове сховище. Ці два рівні досліджень розглядаються як напівнатурне моделювання детального аерокосмічного ГДЗ для відпрацювання методів сегментації та інтерпретації даних. Геоприв'язка кожного вимірювання (пікселя) на маршруті виконувалася за допомогою апаратури GPS.

*Глобальний рівень досліджень* передбачає перевірку та демонстрацію одного з методів на даних середньої спектральної та просторової розрізненностей з КА EO-1 «Hyperion» для розв'язання завдань автоматизації класифікації урболандшафту.

У підрозділі 2.4 наведено основні поняття та визначення методів досліджень. Щодо спектрів відбиття степеневий закон розподілу визначається співвідношеннями

$$p(x) = C_1 x^{-a}, \quad x > 0, \quad a > 0; \quad (1)$$

$$f(x) = C x^{-a}; \quad f(x) \propto x^{-a}; \quad (2)$$

де  $x$  – значення випадкової величини (спектральних інтенсивностей),  $p$  – ймовірності значень  $x$ . Коли при вимірюваннях певної величини  $x$  імовірність  $p$  одержання того або іншого значення обернено пропорційна деякому ступеню  $a$  цього значення (1), то дана величина характеризується степеневим законом розподілу (розподіл типу Ципфа-Парето) з показником  $a$ . За фізичною суттю спектр відбиттів – величина неперервна, отже, закон розподілу може бути визначений через функцію щільності розподілу (2), або з точністю до сталої  $C$ . Розподіли багатьох величин, що вимірюються, групуються близько типових значень. Такі величини мають характерний масштаб, їх мінімальні та максимальні значення відрізняються незначно. Область існування степеневого розподілу набагато більш значна, неможливо виділити вузький інтервал значень, який би характеризував розподіл. При сегментації даних ГДЗ степеневий вид розподілу не дозволяє виділити об'єкти з фону за значеннями спектральних інтенсивностей. Більш того, реальними є випадки, коли для степеневих розподілів відсутні моменти різних порядків: першого порядку – середнє значення, другого порядку – дисперсія, кореляційний момент тощо. Моменти  $k$ -го порядку степеневого розподілу величини  $X$  зі значеннями  $x$  визначаються виразом (3) і є математичним очікуванням  $k$ -го ступеня випадкової

величини  $X$ , починаючи з деякого мінімального значення  $x_{\min}$ , з якого вивчається статистика,

$$M_k = \int_{x_{\min}}^{\infty} x^k f(x) dx = C \int_{x_{\min}}^{\infty} x^{k-a} dx = \frac{C}{k-a+1} \left[ x^{k-a+1} \right]_{x_{\min}}^{\infty}. \quad (3)$$

Моменти  $k$ -го порядку розходяться при показниках  $a \leq k+1$ , та визначені при  $a > k+1$ . Так при  $a \leq 2$  середнє значення степеневого розподілу  $M_{k=1} \rightarrow \infty$  (момент першого порядку розходиться), при  $a > 2$  середнє цілком визначене. Умовою існування моменту другого порядку  $M_{k=2} \in a > 3$ . Аналіз масштабно-інваріантної властивості степеневих розподілів заснований на загальних закономірностях однорідних функцій, а саме: якщо аргумент функції щільності змінити в  $k$  раз, степеневий вид функції та степеневий показник  $a$  залишаться незмінними

$$f(k \cdot x) = C(k \cdot x)^{-a} = C(k^{-a} x^{-a}) = C k^{-a} x^{-a} = C_1 x^{-a}, \quad C_1 = const. \quad (4)$$

Степеневі розподіли спектрів відбиттів мають свої інваріанти відносно деякої множини перетворень. Інваріанти розглядаються як індикаторні ознаки, які використовуються при сегментації та класифікації даних ГДЗ.

Проведено синтез основних прикладних методів визначення симетрій та інваріантів на основі теорії груп Лі. Група перетворень Лі складається з диференційованої множини  $M$ , на яку діє диференційована абстрактна група  $G$

$$\tau: G \times M \rightarrow M, \quad (g, x) = \tau_g(x) = \tilde{x}; \quad \tilde{x} \in M, g \in G. \quad (5)$$

Елементом неперервної  $r$ -параметричної групи є перетворення  $\tau_g(x)$ , яке переводить кожену точку  $x$   $n$ -вимірного простору  $E^n$  в іншу точку  $\tilde{x}$  того ж простору. Кожне перетворення задається системою  $n$  функцій від  $n$  змінних

$$\tilde{x} = f(x, t), \quad x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in E^n, \quad t = (t_1, t_2, \dots, t_r) \in E^r, \quad f = (f_1, f_2, \dots, f_n), \quad (6)$$

які при кожному фіксованому значенні параметрів  $t$  задають перетворення  $x \rightarrow \tilde{x}$  простору  $E^n$ . Кожній  $r$ -параметричній групі відповідає  $r$  диференційних (інфінітезимальних) операторів (7), функціональні коефіцієнти яких (8)

$$L_k = \sum_{i=1}^n \eta_{ki}(x) \frac{\partial}{\partial x_i}, \quad k = \overline{1, r} \quad (7), \quad \text{де} \quad \eta_{ki}(x) = \left. \frac{\partial f_i(x, t)}{\partial t_k} \right|_{t=0}, \quad (8)$$

обчислюються за кінцевими рівняннями групи (6) в околі тотожного перетворення. Перехід від локального задання групи (7) до глобального (6) здійснюється за коефіцієнтами  $\eta_{ki}(x)$  операторів. Для цього необхідно скласти систему диференційних рівнянь

$$\frac{d\tilde{x}_1}{dt} = \eta_1, \quad \frac{d\tilde{x}_2}{dt} = \eta_2, \quad \dots, \quad \frac{d\tilde{x}_n}{dt} = \eta_n \quad (9)$$

та розв'язати її при початкових умовах  $\tilde{x}_1(t=0) = x_1, \dots, \tilde{x}_n(t=0) = x_n$ .

Інваріантом однопараметричної групи перетворень простору  $E^n$  називається функція  $\omega(x)$ , яка не змінює свого значення, якщо на її аргумент

$x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in E^n$  подіяти перетворенням групи:  $\omega(x) = \omega(f(x, t))$ . Критерієм інваріантності функції  $\omega(x) = const$  є виконання умови

$$L\omega(x) \equiv 0, \quad \sum_{i=1}^n \eta_i(x) \frac{\partial \omega(x)}{\partial x_i} \equiv 0. \quad (10)$$

Для однопараметричної групи на площині з координатами  $(x, y)$  наслідком поняття інваріантів є визначення орбіт однопараметричних груп. Орбіта елемента  $x \in M$  при дії групи  $G$  на множину  $M$  визначається як

$$\Omega(x) = \{\tau_g(x) : g \in G\}, \quad (11)$$

і складається з ряду точок множини  $M$ , досяжних з  $x$  при дії перетворень  $G$ . Множина орбіт групи перетворень є інваріантними кривими групи. Сімейство орбіт групи є інтегральним різноманіттям системи

$$dx/d\eta_1(x, y) = dy/d\eta_2(x, y). \quad (12)$$

Для дослідження спектрів відбиттів вводиться до розгляду розширена група та використовується техніка визначення кратних подвійних інваріантів (КПІ). Розширені групи дозволяють знаходити кратні інваріанти: подвійні, потрійні і т.д., а також давати їм певну геометричну або фізичну інтерпретацію. Такі інваріанти називаються ***m*-кратними** інваріантами, а однократні – простими. Якщо в просторі  $E^n(x_1, x_2, \dots, x_n)$  задана  $r$ -параметрична група перетворень  $G$  з операторами  $L_1, L_2, \dots, L_r$ , то двічі розширена група перетворень  $2G$  визначається операторами

$$L_i + \bar{L}_i, \quad L_2 + \bar{L}_2, \dots, \quad L_r + \bar{L}_r, \quad (13)$$

де  $\bar{L}_i$  – оператор, отриманий з  $L_i$  шляхом заміни системи  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  системою змінних  $\bar{x} = (\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n)$ , не залежних від змінних  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . В  $m$  раз розширеній групі число змінних дорівнює  $mn$ . У двічі розширеній групі  $2G$  число змінних –  $2n$ . Якщо група  $2G$  має інваріанти, то система

$$L_i + \bar{L}_i = 0, \quad i = 1, 2, \dots, r \quad (14)$$

має нетривіальні розв'язки, серед яких будуть подвійні інваріанти групи. Критерієм інваріантності функції  $\omega(x, \bar{x}) = const$ , при дії на неї двічі розширеної групи  $2G$ , є виконання умови

$$L_i \omega(x, \bar{x}) + \bar{L}_i \omega(x, \bar{x}) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, r. \quad (15)$$

Проведено вибір і обґрунтування підходів та математичних методів для фрактального аналізу даних ГДЗ. Аналізуються негладкі об'єкти із дробовими (фрактальними) розмірностями Хаусдорфа-Безиковича, Мінковського, розглянуто визначення розмірностей клітинним методом. В основу методів покладено обчислення значень степеневих показників функцій, що встановлюють степеневу залежність між розміром (масштабом аналізу) і мірою (спектрометричною). Відзначається, що для опису багатьох структур природних об'єктів, геосистем та їх спектральних яскравостей адекватним способом опису є неперервні негладкі недиференційовані функції та методи фрактального та мультифрактального аналізу (див. розділ 5, 6).

**У третьому розділі** – “Статистичні закономірності гіперспектральних відбиттів світлового потоку. Частотні розподіли” – проведено статистичний

аналіз даних спектрів відбиттів рослинних покривів на територіях родовищ із глибоким заляганням вуглеводнів і підземного газового сховища. Аналіз проводиться відповідно до розробленої методології аналізу частотних розподілів гіперспектральних даних (підрозділи 3.1-3.3).

В якості сукупності елементів береться набір спектральних діапазонів довжин хвиль (каналів приладу), кожному з елементів набору (каналу) відповідає певне значення випадкової величини – інтенсивності відбиття (варіанта). Гіперкуб даних і СМ-матриці розглядаються як сукупності елементів, мінімальний набір сукупності відповідає одному стовпцю СМ-матриці: одній спектрограмі при контактних вимірюваннях, або одному пікселю при ГДЗ. Виконується ранжирування варіанти розбивкою області її значень на клас-інтервали. Кількість елементів сукупності (спектральних каналів), що потрапляють у клас-інтервали, прийнято називати частотами. *Розподіл частот по клас-інтервалах називається частотним розподілом.* Частоти можуть бути виражені як у натуральному абсолютному вимірі  $n_i$ , так і у відносних одиницях  $\tilde{n}_i$ . В останньому випадку  $n_i$  слід нормувати. Полігон частот (рис. 4) спектрограми листка берези в діапазоні вимірювань 350÷749 нм, за

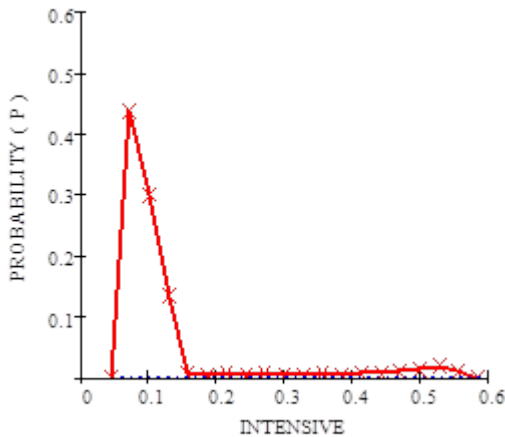


Рис. 4. Полігон частот

зовнішнім виглядом відповідає степеневому розподілу – має різко скошені в лівій частині схил і “важкий хвіст” з лептоексцесом. Відносна частота трактується як імовірність, що підрахована безпосередньо за схемою сприятливих випадків, а частотний розподіл – як розподіл випадкової величини (розподіл імовірностей) інтенсивності світлового потоку. У підрозділі 3.4 досліджено можливість ідентифікації законів розподілів спектрів відбиттів через функцію розподілу та функцію щільності. Вводяться позначення:  $X$  – випадкова величина спектральної

інтенсивності;  $p_i = P(X = x_i)$  – імовірність того, що  $X$  набуде значення  $x_i$ . Функція розподілу  $F(x) = P(X < x)$ , існує як для дискретного спектра відбиттів, так і для його неперервного виразу. Для неперервної змінної  $x$  функція розподілу  $F(x)$  пов'язана з функцією щільності  $f(x)$  інтегральним співвідношенням

$$F(x) = P(X < x) = \sum_{x_i < x} P(X = x_i); \quad F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx. \quad (16)$$

Щільність характеризує ймовірність потрапляння випадкової величини на ділянку від  $x$  до  $x + \Delta x$ ,  $P(x < X < x + \Delta x) = F(x + \Delta x) - F(x)$  при досить малих  $\Delta x \rightarrow 0$ . Проведений аналіз показує, що частотні розподіли спектрів рослин мають значну регулярність. Їхні полігони частот і гістограми апроксимуються степеневими функціями. Зроблено висновок, що ідентифікації розподілів перешкоджає статистичний шум, який спостерігається при малих значеннях  $\Delta x$ , що дозволяє лише оцінити близькість розподілу до степеневого.

У четвертому розділі – “Неперервно-групова модель, симетрії та інваріанти спектрів відбиттів” – розроблено та верифіковано методи опису, апроксимації та ідентифікації симетрій степеневих розподілів спектрів відбиттів світлового потоку, а також процедури визначення простих і кратних інваріантів розподілів за даними ГДЗ детальної та середньої розрізненності. Виклад матеріалу розділу здійснюється відповідно до основних понять, введених у підрозділі 2.4.

У підрозділі 4.1 визначено певні умови нормування щільності розподілів  $u(x)$  значень спектральних інтенсивностей  $x$ :

$$u(x) = Cx^{-a}, \text{ при } a = \text{const}, a > 0. \quad (17)$$

Значення нормувального коефіцієнта  $C$  визначаються з рівняння

$$1 = \int_{x_{\min}}^{\infty} u(x) dx = C \int_{x_{\min}}^{\infty} x^{-a} dx = \frac{C}{1-a} x^{-a+1} \Big|_{x_{\min}}^{\infty}, \quad C = (a-1)x_{\min}^{a-1}, \quad (18)$$

Нормований вираз (17) має вигляд  $u(x) = [(a-1)x_{\min}^{a-1}] x^{-a}$ , який показує, що різні умови нормування змінюють значення лише величини  $C$  і не змінюють степеневому виду розподілу, а також значення степеневому показника  $a$ . Значення  $C$  не характеризує основні властивості розподілу, що дозволяє виразити степеневий закон для неперервної варіанти через функцію щільності  $u(x)$  з точністю до сталої:  $u(x) \propto x^{-a}$ . При  $a \leq 1$  розподіл не може бути нормований, тому що права частина рівняння (18) розходиться. У підрозділі 4.2 визначена група симетрії спектрів відбиттів світлового потоку, що відповідають степеневому закону розподілу (17). Завдання зводиться до визначення виду групи  $G$ , перетворень точок області евклідового простору  $E^2$  з координатами  $\{x, u(x)\}$ , якщо відомо, що орбіти групи задані рівнянням (17). У підрозділі 4.3 наведений висновок співвідношень для визначення простих і кратних інваріантів групи  $G$ , які далі, при сегментації та класифікації даних ГДЗ, беруться за індикаторні ознаки природних об'єктів і ознаки станів. Позначивши в співвідношенні (17) степеневий показник через  $b = -a$ , щільність розподілу  $u$  – через  $y$ , визначаємо оператор  ${}_sL$  групи симетрії, для якої сімейство кривих розподілу  $\omega(x, y): y/x^b = C$  є орбітами та інваріантом групи. Умова інваріантності (10) виконується для оператора групи неоднорідних розтягнень

$${}_sL = x \frac{\partial}{\partial x} + by \frac{\partial}{\partial y}, \quad {}_sL \omega(x, y) = x \frac{\partial}{\partial x} (y/x^b) + by \frac{\partial}{\partial y} (y/x^b) \equiv 0.$$

Кінцеві рівняння однопараметричної групи симетрії з параметром  $\gamma$ , визначаються, згідно співвідношень (9), як розв'язок системи рівнянь

$$\frac{d\tilde{x}}{d\gamma} = \tilde{x}, \quad \frac{d\tilde{y}}{d\gamma} = b\tilde{y}; \quad \tilde{x}(\gamma=0) = x, \quad \tilde{y}(\gamma=0) = y; \quad (19)$$

$$\tilde{x} = tx, \quad \tilde{y} = t^b y; \quad (20)$$

де  $t = e^y$ ,  $0 \leq t \leq \infty$ . Група перетворень (20) з параметром  $t$  показує, що при змінах значень спектральних інтенсивностей  $x$  (розтягненні, стиску) в  $t$  раз, щільність розподілу змінюється в  $t^b$  раз. Орбіти  $y/x^b = C$  групи є її простими інваріантами, будь-яка функція від яких також є інваріантом групи. Отже, співвідношення в білогарифмічних координатах

$$\ln y - b \ln x = C_1 \quad (21)$$

задає множину інваріантних прямих групи (20). На рис. 5 наведено графіки функції щільності степеневого розподілу (криві розподілу)  $u(x)$  випадкової величини спектральної інтенсивності  $x$ , отримані при різних значеннях коефіцієнта нормування  $C$ .

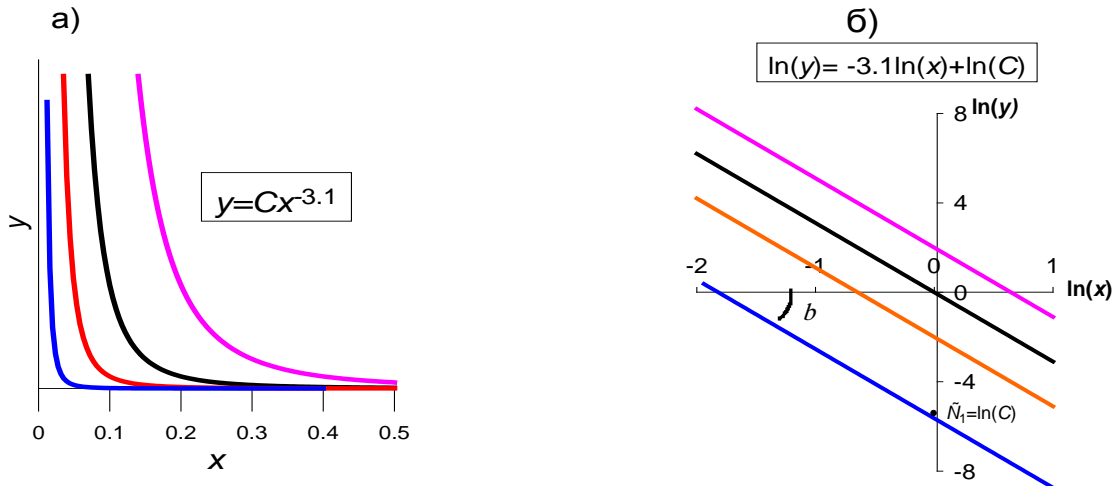


Рис. 5. Орбіти групи симетрії розподілу спектрів відбиттів пшениці в нормальних (а) і білогарифмічних (б) координатах,  $b = -3,1$

Визначення кратних подвійних інваріантів (КПІ) групи симетрії  $G$  розподілів спектральних відбиттів складається з визначення розширеної групи перетворень  $2G$  згідно співвідношення (14) і перевірки виконання умови інваріантності (15). Для співвідношення (22) умова інваріантності виконується:

$$\omega(x_1, y_1, x_2, y_2) = \frac{\ln y_2 - \ln y_1}{\ln x_2 - \ln x_1}, \quad \ln x_1 \neq \ln x_2; \quad (22)$$

$${}_{2D}L\omega = \left\{ x_1 \frac{\partial}{\partial x_1} + b y_1 \frac{\partial}{\partial y_1} + x_2 \frac{\partial}{\partial x_2} + b y_2 \frac{\partial}{\partial y_2} \right\} \left( \frac{\ln y_2 - \ln y_1}{\ln x_2 - \ln x_1} \right) \equiv 0.$$

Вираз (22) – КПІ групи симетрії, КПІ дорівнює кутовому коефіцієнту  $b$  кожної з білогарифмічних прямих орбіт групи  $G$  (див. рис. 5 б). Властивість масштабної інваріантності є унікальною властивістю степеневого розподілу, інші закони розподілів такої властивості не мають. При гіперспектральній зйомці об'єктів, спектри відбиттів яких відповідають степеневому закону, значення КПІ не змінюється при змінах інтенсивності освітлення об'єктів. У підрозділі 4.5 (пункти 4.5.1-4.5.7) розроблено чисельний метод визначення КПІ за даними ГДЗ. Метод включає структурну та параметричну ідентифікацію розподілів спектрів відбиттів, і заснований на обчисленнях кумулятивної функції розподілу (23) яка є аналогом

функції розподілу  $F(x)$  (див. (16)), але враховує той факт, що степеневий розподіл розходиться при малих значеннях спектральних інтенсивностей  $x$

$$F^*(x) = \int_x^\infty u(x) dx = C \int_x^\infty \hat{x}^{-a} d\hat{x} = \frac{C}{a-1} x^{-(a-1)} = C_2 x^{-(a-1)}. \quad (23)$$

Співвідношення (23) показує, що  $F^*(x)$ , як і функція щільності  $u(x)$ , є степеневою функцією, показник якої дорівнює  $(a-1)$ . Кумулятивна функція розподілу визначена як для неперервної змінної  $X$  зі значеннями  $x$ , так і для дискретних значень

$$F^*(x) \approx P(X \geq x) = \sum_{x_i \geq x} P(X = x_i). \quad (24)$$

Обчислення  $F^*(x)$  за формулою (24) ілюструються на рис. 6, та інтерпретується як площа під кривою розподілу. Для обчислення  $F^*(x)$  застосовується ранг-частотна процедура.

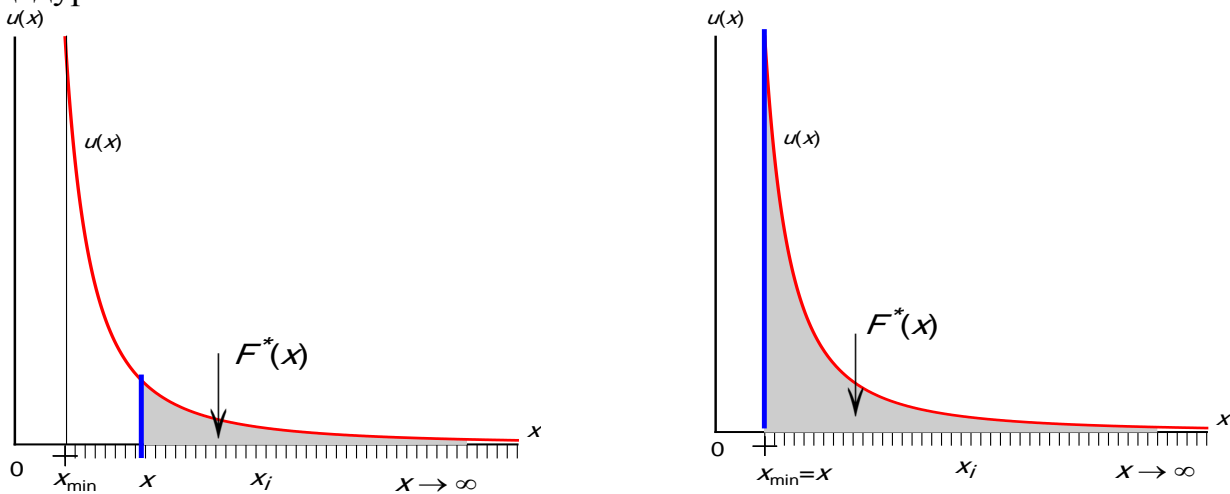


Рис. 6. Геометрична інтерпретація обчислень кумулятивної функції  $F^*(x)$

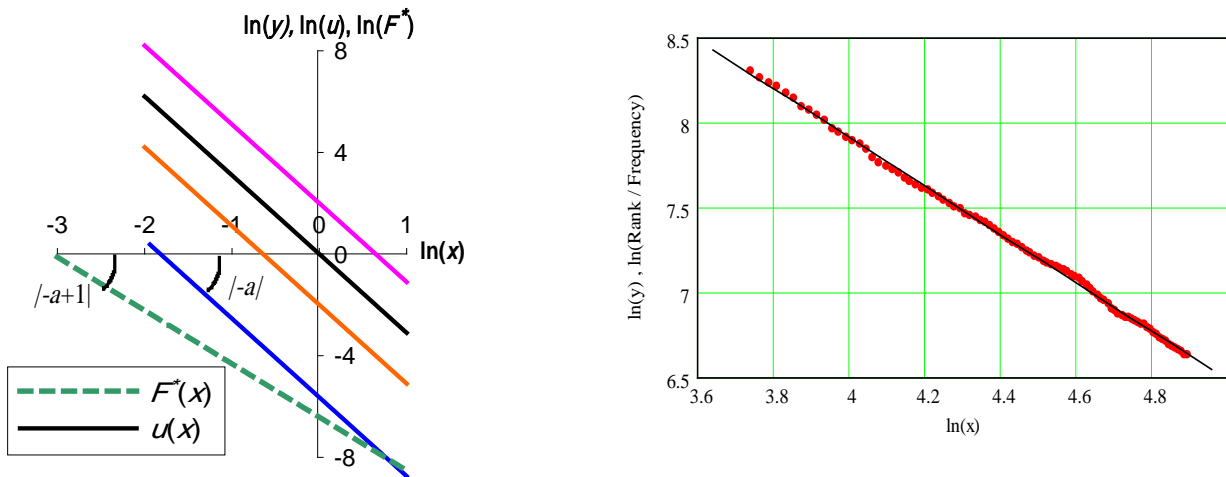


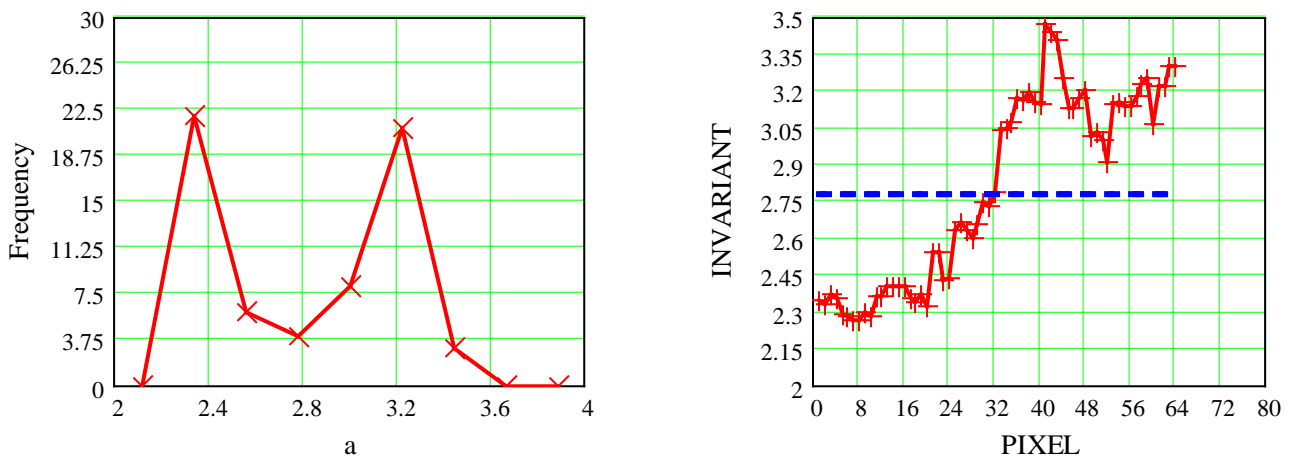
Рис. 7. Графіки обчислень КПІ рослин за кумулятивною функцією: ліворуч – пшениці  $u(x) = Cx^{-3.1}$ ,  $F^*(x) = C_1 x^{-2.1}$ ; праворуч – листя ясена  $F^*(x) \propto x^{-1.428}$

На рис. 7 показано обчислення КПІ за значеннями коефіцієнтів нахилу білогарифмічних орбіт  $\ln F^*(x) = \ln C_1 - (a-1) \ln x$ , лівий графік для спектрів відбиттів пшениці, правий графік для листя ясеня. Контрольована стандартна

помилка  $E < 0,02$ . Точками на графіку рис. 7 показаний процес побудови дискретної кумулятивної функції розподілу інтенсивностей для сукупності з 16 спектрограм листя ясени, та апроксимація неперервною степеневою функцією  $F^*(x) \propto x^{-1.428}$ , щільність розподілу  $u(x) \propto x^{-2.428}$ , КПІ щільності розподілу  $a = 2,428$ . У підрозділі 4.6 проведено верифікацію неперервно-групової моделі та методу КПІ для задачі пошуку та визначення границь покладів вуглеводнів. Статистичний ряд розподілів КПІ зведений у матрицю  $M$

$$M = \begin{pmatrix} 2.111 & 2.333 & 2.556 & 2.778 & 3 & 3.222 & 3.444 & 3.667 & 3.889 \\ 0 & 22 & 6 & 4 & 8 & 21 & 3 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Графік частотних розподілів індикаторної ознаки КПІ наведено на рис. 8.



*визначення порогу КПІ (позначка a)*

*сегментація пікселів по порогу інваріанта*

Рис. 8. Порогова сегментація даних ГДЗ району покладу газу за ознакою КПІ

Границя покладу газу проходить по 32-у пікселю маршруту, геодезичні координати якого знаходяться на межі газового сховища. Пікселі № 1÷31 розташовані поза покладом, № 33÷64 знаходяться над покладом (див. рис. 8). Поріг сегментації визначається за значенням КПІ  $a = 2,778$ .

У підрозділі 4.7 досліджено застосування методу КПІ для автоматизації класифікації об'єктів на космічних ГСЗ середньої спектральної та просторової розрізненості. На рис. 9 наведено ГСЗ частини м. Києва з КА EO-1 «NuRegion» від 14.09.2002 р., спектральна розрізненість 10 нм, просторова – 30 м/п. В обробленні використовувалися 45 каналів діапазону 410÷860 нм. Завдання полягало у виконанні класифікації об'єктів урболандшафту виставкового комплексу (ВДНГ) методом КПІ. Результат автоматизованої класифікації ілюструється на рис. 11. Підготовчий етап передбачає формування індикаторних ознак опису 4-х класів. Для цього обчислюються значення КПІ пікселів фрагментів ГСЗ, прийнятих за еталони класів і визначаються інтервальні значення КПІ. Райони вибірки еталонів наведено на рис. 9. Для множини значень КПІ еталонних вибірок гістограмним методом (рис.9) визначається інтервал значень КПІ класу (табл. 1). Обирається фрагмент ГСЗ із зображенням ВДНГ (рис. 10). Для кожного пікселя фрагмента обчислюється значення КПІ, яке порівнюється з інтервалами змін КПІ еталонів.

## Класи та їх індикаторні ознаки – кратні подвійні інваріанти (КПІ)

№	Найменування класу	Інтервали значень КПІ	Інтервали КПІ для урболандшафту
1	Водна поверхня	2,47 – 2.8	2,47 – 2.8
2	Лісова рослинність	3 – 3,4	3 – 3.85
3	Будинки, споруди, дороги	3,9 – 5,4	3,9 – 5.4
4	Лугова рослинність	5,5 – 6,1	5,541 – 6,1
3 д.	Червоні: пластикове покриття дахів, тротуарна плитка, (3 д. включено до класу 3)		6,5 – 9

Комп'ютерний аналіз пікселів (табл. 2) показує приналежність пікселя до певного класу (номер зазначений у дужках). Визначення площ під кожним класом виконується підрахунком кількості пікселів. Аналіз гістограми дозволив виділити додатковий клас, обумовлений змішаними пікселями – “урболіс” (рис. 11). Лісопаркової зони ВДНГ характеризується мережею асфальтованих доріжок і малорозмірних споруд, що сховані від спостерігача серед листя дерев, але чітко виявляються при ГДЗ.

Отже, у повній відповідності з математичною постановкою задачі сегментації ГСЗ (див. розділ 1) на глобальному рівні досліджень зроблено автоматизовану сегментацію та класифікацію даних пороговим методом за індикаторною ознакою КПІ.

Таблиця 2

## Результат автоматизованої класифікації за критерієм КПІ приналежності пікселів класу об'єктів, визначення займаних класами площ за ГСЗ

Растр	КПІ/Клас	Растр	КПІ/Клас	“	Растр	КПІ/Клас	Растр	КПІ/Клас
0 0	8.654(3)	12 0	5.214(3)	“	10 13	3.462(2)	5 14	3.503(2)
1 0	6.779(3)	13 0	5.014(3)	“	11 13	3.677(2)	6 14	3.255(2)
2 0	4.956(3)	14 0	5.365(3)	“	12 13	3.354(2)	7 14	3.255(2)
3 0	5.269(3)	15 0	4.644(3)	“	13 13	3.321(2)	8 14	3.360(2)
4 0	5.288(3)	16 0	4.474(3)	“	14 13	3.446(2)	9 14	3.459(2)
5 0	5.288(3)	0 1	8.654(3)	“	15 13	3.574(2)	10 14	3.414(2)
6 0	5.045(3)	1 1	5.918(4)	“	16 13	3.500(2)	11 14	3.677(2)
7 0	5.480(2)	2 1	4.504(3)	“	0 14	5.330(3)	12 14	3.375(2)
8 0	4.433(3)	3 1	5.338(3)	“	1 14	5.637(4)	13 14	3.492(2)
9 0	4.833(3)	4 1	5.073(3)	“	2 14	3.709(2)	14 14	3.521(2)
10 0	4.740(3)	5 1	4.244(3)	“	3 14	3.542(2)	15 14	3.437(2)
11 0	5.363(3)	6 1	4.041(3)	“	4 14	3.368(2)	16 14	3.493(2)

РАЗОМ площі в пікселях: вода 0; рослинність: лісова та урболісова 99; лугова 21; будинки, споруди, дороги 135.

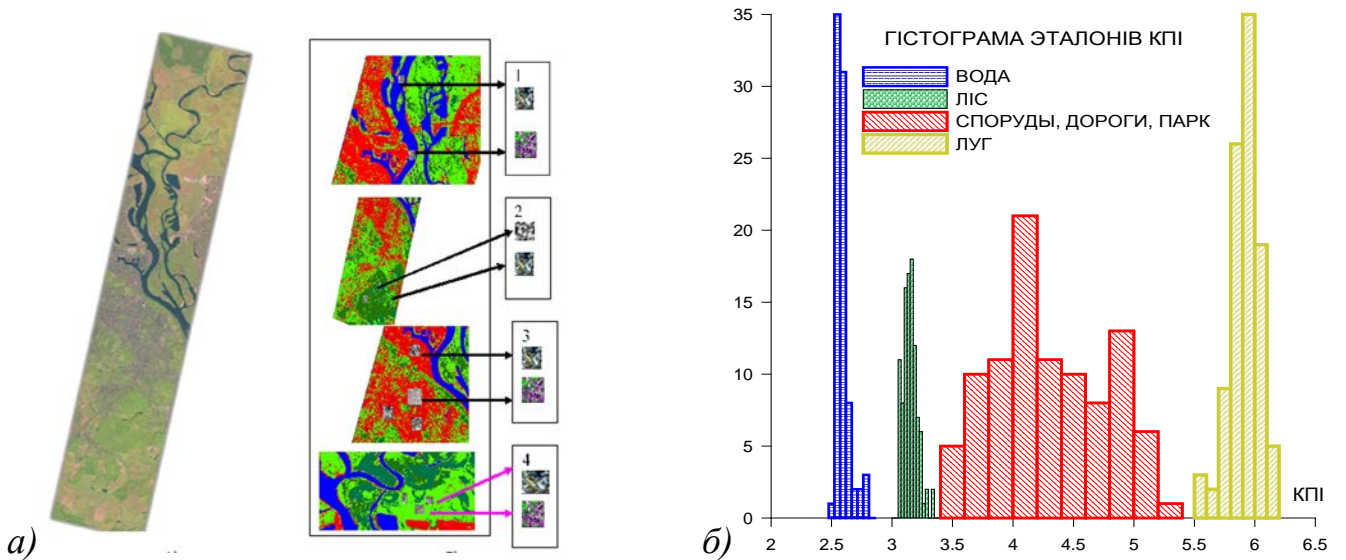


Рис. 9. Формування КПІ еталонних об'єктів урболандшафту: а) зображення м. Києва з ЕО-1 «Hyperion», фрагменти вибірок еталонів; б) гістограми частотних розподілів КПІ в еталонних вибірках

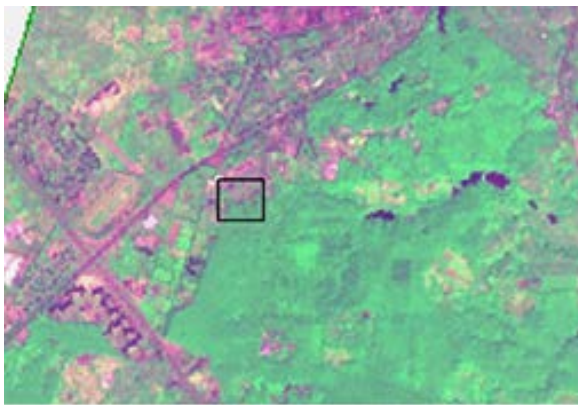


Рис. 10. Зображення ВДНГ (квадрат): з ЕО-1 «Hyperion», на картосхемі

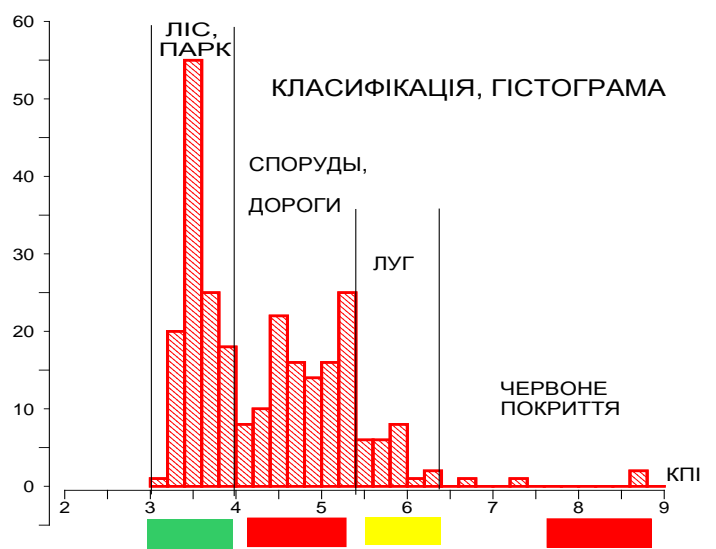


Рис. 11. Автоматизована класифікація урболандшафту ВДНГ за критерієм КПІ гіперспектрального зображення в діапазоні 410÷860 нм; рослинність: 2- лісова, 4- лугова, 5- урболісова; 3- дороги, споруди

У п'ятому розділі – “Неоднорідна фрактальна модель спектрів відбиттів” – проведено модифікацію методів фрактального аналізу та розроблено моделі опису локальних структур спектрів відбиттів. На прикладах демонструється обчислення розмірностей спектрів і застосування моделі для визначення аномальних зон, спричинених покладами вуглеводнів.

У підрозділі 5.1 відзначається, що степеневі закони розподілу спектру відбиття, які спостерігаються при статистичному аналізі даних ГДЗ природних об'єктів, притаманні складним самоорганізованим системам, з фрактальною структурою і є передумовою для проведення досліджень локальної структури спектрів методами фрактального аналізу. У підрозділах 5.2, 5.3 розроблено методи обчислень локальних розмірностей структур спектрів, у яких використовується визначення розмірності Мінковського та модифіковано клітиний метод (*box dimension*). Обчислення локальних розмірностей спектральних даних, представлених гіперкубом, передбачає перегляд набору СМ-матриць “стрибаючим вікном”  $B$  (див. рис.2). Вікно  $B$  вирізує з СМ-матриці область зі значеннями спектральних інтенсивностей  $k(i,j)$ , що задані на ґратках  $(i \times j)$  спектральних діапазонів  $i=1,2,\dots,K$  і пікселів  $j=1,2,\dots,K$ . Дані у вікні  $B$  масштабуються та квантуються на  $K$  відліків  $k=1,2,\dots,K$ . Тривимірне представлення матриці квантованих значень –  $B^*$ ,  $(i \times j \times k)$  відповідає інформаційному кубу зі стороною ребра  $K$  (рис. 12). З фізичних міркувань спектральна інтенсивність  $z$  є неперервною функцією  $z=f(x,y)$  2-х змінних:  $x$  – довжина світлової хвилі,  $y$  – довжина фрагмента зображення. Ця функція розглядається як негладка поверхня об'ємного фрактала  $A$ . Завдання полягає у визначенні розмірності фрактала спектральних відбиттів  $A$ . Для вимірювання множини  $A$  вводиться спектрометрична міра  $\nu$  множини  $A$ , чисельно рівна об'єму, який займає множина  $A$  в інформаційному кубі:

$$\nu(D, A) = \sum^{N(r)} r^D = N(r)r^D, \quad (25)$$

де  $r$  – розмір ребра мірного куба в частках розміру ребра інформаційного куба,  $D$  – шукана розмірність множини  $A$ ;  $N(r)$  – функція спектрометричної міри, дорівнює найменшому числу мірних кубів, необхідних для покриття  $A$ . На рис. 12 мірний куб позначений  $M$ , розмір його ребра  $r=1/K=1/10$ . Розмір ребра інформаційного куба прийнятий за одиницю. Знайдемо значення  $D$ , при якому міра не залежить від розміру мірного куба та залишається сталою,  $\nu=c$ . З виразу (25) визначається наближена рівність (26), яка використовується для обчислень значення розмірності  $D$ :

$$\log(N(r)) = \log(c) - D \log(r). \quad (26)$$

Рис. 12. Об'ємний фрактал спектральних відбиттів

Розмірність  $D$  дорівнює модулю коефіцієнта нахилу білогарифмічної прямої регресії, побудованої при різних значеннях розміру  $0 < r \leq 1$  (див. рис. 13).

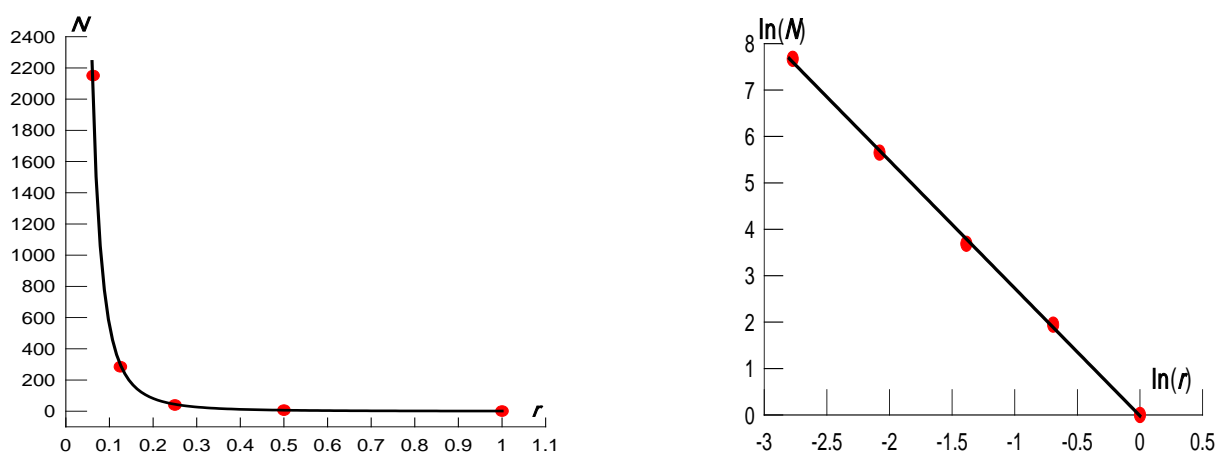


Рис. 13. Графіки залежності функції спектрометричної міри  $N(r)$  від розміру ребра  $r=\{1/16, 1/8, 1/4, 1/2, 1\}$  мірного куба, у натуральному та білогарифмічному масштабах для спектра відбиття пшениці,  $D=2,749$

Значення  $D$  є масштабним інваріантом локальної структури спектра. На рис. 13 наведено графіки результату застосування методу для визначення розмірності фрагмента СМ-матриці спектра відбиття пшениці, вкладеного у вікно  $B^*$  розміром 16 пікселів у діапазоні  $734 \div 749$  нм і розрізненістю 1 нм. Фрактальна розмірність фрагмента  $D=2,749$ . Розмірність  $D$  характеризує ступінь заповнення фракталом  $A$  інформаційного куба,  $2 \leq D \leq 3$ . Якщо всі квантовані значення спектральних інтенсивностей  $k(i,j)$  рівні, то  $D=3$ . Для абсолютно чорного тіла спектральна інтенсивність дорівнює нулю та  $D=2$ , що відповідає топологічній розмірності площини, на основі якої побудований інформаційний куб. Аналогічні степеневі залежності, але з різними значеннями  $D$  спостерігаються при перегляді стрибаючим вікном усіх фрагментів СМ-матриці в діапазоні  $350 \div 926$  нм. Процедуру методу наведено в додатку Б.1. Зв'язок розглянутого методу з розмірностями Мінковського  $d$  встановлюється граничним переходом у виразі (26):

$$d = - \lim_{r \rightarrow 0} [\log N(r) / \log(r) - \log(c) / \log(r)] = - \lim_{r \rightarrow 0} [\log N(r) / \log(r)]. \quad (27)$$

У підрозділі 5.3 досліджено застосування для обчислень локальних розмірностей формулу (27) при  $r \ll 1$ . Цей метод отримав назву «Метод оцінок фрактальних розмірностей локальної структури спектрів». Порівняння точності методу оцінок (27) з методом обчислень розмірностей спектрів (26) показує, що похибка обчислень не перевищує 1% для  $r=1/16$ . Метод оцінок вирізняється простотою реалізації (додаток Б.2) та високою швидкістю. Метод рекомендований для проведення експрес-оцінок розмірностей спектрів на борту ЛА. Методами визначення фрактальних розмірностей спектрів обчислюється поле фрактальних розмірностей підстильної поверхні. Аналіз структури поверхні за польовими функціями розмірностей розглянуто в підрозділі 5.4. Обчислення поля фрактальних розмірностей розглядається як етап попереднього оброблення ГСЗ, у результаті якого відбувається скорочення обсягу даних, скорочення оцінюється величиною  $K^2$ . Для розміру вікна  $B$ , що дорівнює 16 відлікам – у 256 разів, а при  $K=32$  – у 1024. Усім значенням інтенсивностей у вікні  $B$  (див. рис.2) поставлено у відповідність одне число  $D$ , яке надалі як індикаторна ознака використовується для сегментації.

Отже, в процесі попереднього оброблення можливе скорочення переданої з борту ЛА гіперспектральної інформації у 1024 рази для подальшого фрактального оброблення даних в наземних центрах. Фрактальні розмірності спектрів відбиттів розглядаються як скалярна функція точки  $M(x, y, \lambda)$  області  $V \subset E^3$ . Координати точки  $(x, y)$  визначаються в місцевій системі координат  $Oxy$ , координата  $\lambda$  – спектральна, задає довжину хвилі спектра відбитого світлового потоку. Поле розмірностей є нефрактальною скалярною функцією 3-х змінних  $D = u(x, y, \lambda)$ , і становить найбільш загальну модель неоднорідної фрактальної структури спектрів відбиттів. Поле розмірностей як функція 3-х змінних може зображуватися в перерізах по одній з координат (рис. 14).

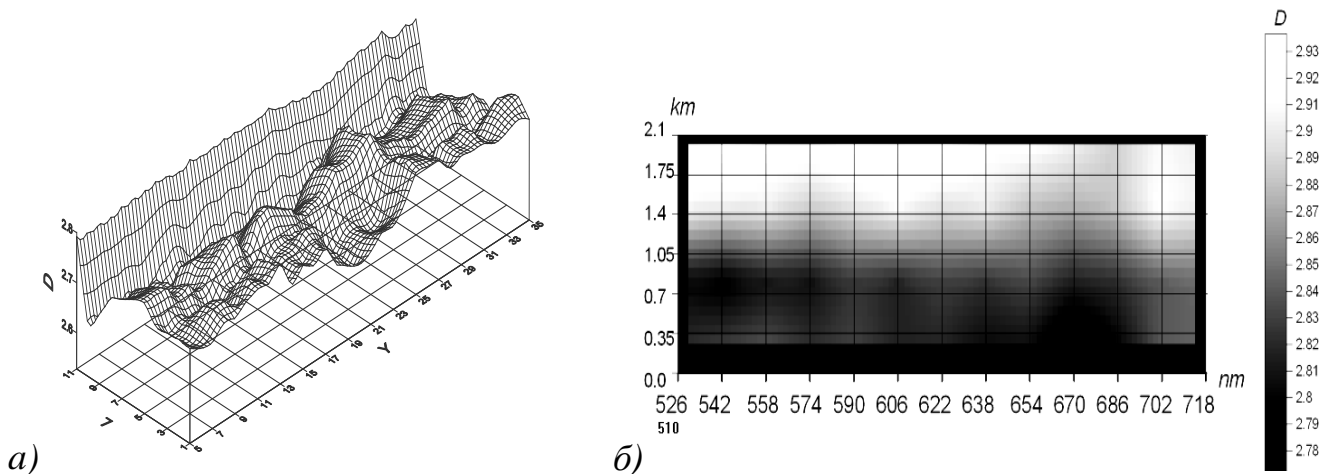


Рис. 14. Представлення поля фрактальних розмірностей в перерізах: а) графіком, б) зображенням

У багатьох застосуваннях заміна поля спектральних яскравостей ГСЗ полем спектральних розмірностей  $D$  є більш інформативним. На рис.14 а наведено фрагмент перерізу поля розмірностей спектра відбиття листяного покриву. При  $x=c$  це функція 2-х змінних:  $L$  – номери спектральних піддіапазонів,  $Y$  – відстань вздовж обраного маршруту,  $D$  – розмірність. Поле масштабних інваріантів  $D$  є індикаторною ознакою покладів вуглеводнів і може бути підготовлене для візуального сприйняття по перерізах. Для цього яскравостям пікселів екрану надаються значення інваріантів. Гранична сегментація здійснюється зміною контрастності зображення. На рис.14 б наведене поле розмірностей  $D$  спектра відбиття пшениці за маршрутом дистанційного зондування Глібовського газового сховища. Довжина маршруту 2,1 км. Усього 64 пікселя на маршруті, спектральний діапазон 526÷733 нм. Межа початку покладу проходить на рівні 1,4 км від початку маршруту, що відповідає розмірам сховища.

У підрозділі 5.5 досліджено зміну фрактальних розмірностей спектрів рослинного покриву під впливом покладів вуглеводнів. Встановлено, що при перетині границі покладу значна зміна розмірності  $D$  фіксується в широкому спектральному діапазоні 526÷733 нм; це дозволяє перейти від поля розмірностей  $D = u(x, y, \lambda)$  до середнього поля  $\langle D \rangle = \varphi(x, y)$  та визначити границю покладу на картосхемі (рис.15).

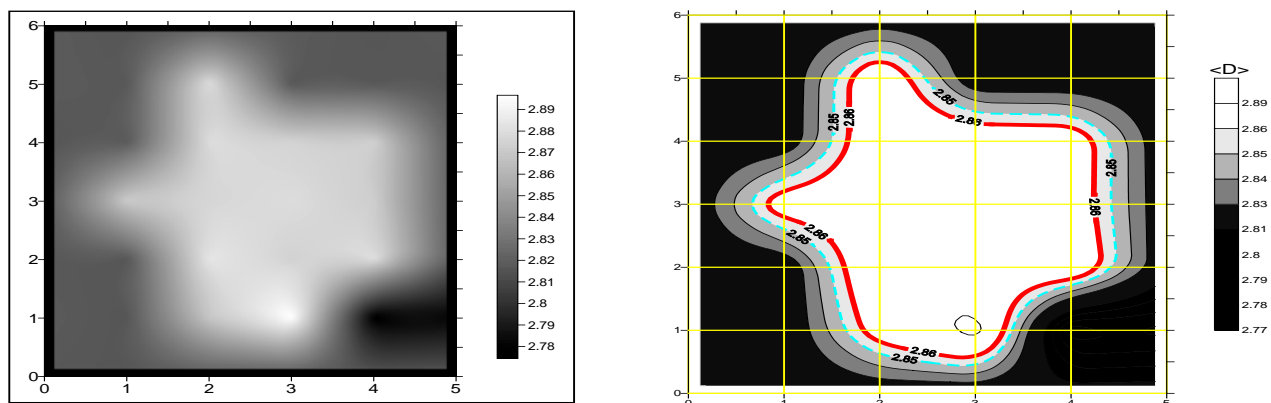


Рис. 15. Модельний приклад побудови середнього поля фрактальної розмірності спектра відбиття рослинності над покладом вуглеводнів

У шостому розділі – “Мультифрактальні структури гіперспектральних відбиттів” – розроблено мультифрактальну модель розподілу спектральних інтенсивностей відбитого світлового потоку по кадру ГСЗ або СМ-матриці гіперкуба даних. У підрозділах 6.1-6.3 обґрунтовується застосування теорії мультифракталів до гіперспектрального аналізу; вводиться формальне визначення фізіологічного стану рослинних покривів, яке визначається варіабельністю показника Ліпшиця-Гельдера мультифрактального спектру та слугує індикаторною ознакою наявності покладів вуглеводнів.

Мультифрактальний аналіз результатів гіперспектральних вимірювань, представлених у вигляді гіперкуба даних набором кадрів ( СМ-матриць, див. рис. 2) здійснюється за одним методом для всіх рівнів досліджень. Завдання полягає в описі розподілу квантованих цілочисельних значень інтенсивностей по кадру, розбитому на рівні квадратні ячейки змінного розміру  $r$ . Діапазон зміни гіперспектральних інтенсивностей кадру квантується на  $kv$  цілочисельних відліків, мінімальний відлік дорівнює одному кванту. Розмір ячейки  $r$  задається в частках максимального розміру  $r=K$

$$r_j = 2^{-j}, \quad j = \overline{0, b}, \quad K = 2^b; \quad \text{для } b=4, \quad r = \left\{ \frac{1}{2^0} = 1, \frac{1}{2^1} = \frac{1}{2}, \frac{1}{2^2} = \frac{1}{4}, \frac{1}{2^3} = \frac{1}{8}, \frac{1}{2^4} = \frac{1}{16} \right\}. \quad (28)$$

Розподіл квантованих значень інтенсивностей у кожній  $i$ -й ячейці характеризується набором чисел  $k_i(r)$ , що показують, скільки квантів знаходиться в  $i$ -й ячейці. Мірою (ймовірнісною) вмісту  $i$ -ї ячейки є частка  $p_i(r)$  від загального числа  $L$  квантів у всіх

ячейках:  $p_i(r) = \frac{k_i(r)}{L}$ ,  $\sum_{i=1}^{N(r)} p_i(r) = 1$ . Повний набір  $\{p_i(r)\}_{i=1}^{N(r)}$  при мінімальному

значенні  $r$ , дає опис розподілу квантів по кадру. Якщо статистична сума, що вводиться до розгляду,  $Z(q, r)$ ,  $-\infty < q < \infty$  пов'язана з розміром  $r$  степеневою залежністю

$$Z(q, r) = \sum_{i=1}^{N(r)} p_i^q(r) = c(q) r^{-\tau(q)}, \quad \ln(Z_q(r_j)) = \ln(c(q)) - \tau(q) \ln(r_j), \quad j = \overline{0, b}, \quad (29)$$

то такий розподіл може бути представлений мультифракталом. Дослідження гіперспектральних відбиттів листя дерев і посівів пшениці показали виконання

умови (29), що верифікує мультифрактальну структуру розподілів. Гіперспектральні відбиття з високим ступенем точності відповідають степеневому скейлінгу.

На рис.16 наведено результат аналізу гіперспектрального відбиття листя як сукупності 16 спектрограм у діапазоні вимірювань 350 ÷ 749 нм. Значення  $r$  задані співвідношенням (28),  $-3 \leq q \leq 4$ . Значення масштабного інваріанта  $\tau(q)$  визначаються умовою

$$\tau(q) = - \lim_{r \rightarrow 0} \left[ \frac{\ln(Z(q,r))}{\ln(r)} \right] \quad (30)$$

Розмірності Реньї мультифрактала знаходяться згідно виразу

$$D_q = \frac{\tau(q)}{1-q}, \text{ що відповідає виразу}$$

розмірностей через ентропію Реньї

$$H_q^{(R)}: \quad D_q = \lim_{r \rightarrow 0} \left[ - \frac{H_q^{(R)}}{\ln(r)} \right],$$

$$H_q^{(R)} = \frac{1}{1-q} \ln \sum_{i=1}^N p_i^q, \quad \sum_{i=1}^N p_i = 1.$$

Спектр сингулярностей мультифрактала визначається функцією  $f(\alpha)$  за допомогою

перетворення Лежандра:  $\alpha(q) = - \frac{d}{dq} \tau(q), \quad f(\alpha(q)) = q\alpha(q) + \tau(q).$

Значення  $f(\alpha)$  відповідають фрактальним розмірностям Хаусдорфа,  $\alpha$  – показник Ліпшиця-Гельдера. На рис. 17 наведено шість функцій  $f(\alpha)$  гіперспектральних відбиттів листяного покриву з родовища нафти. На рис. 18 показаний вид функції  $f(\alpha)$ , коли у всіх ячейках знаходиться однакова кількість квантів  $k_i(r)$ .

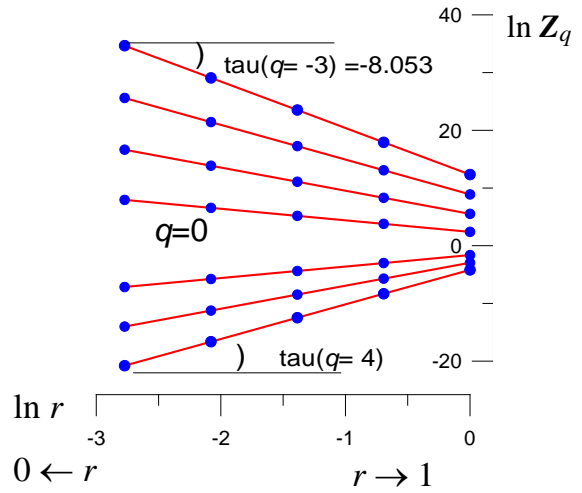


Рис. 16. Мультифрактал відбиття листя берези

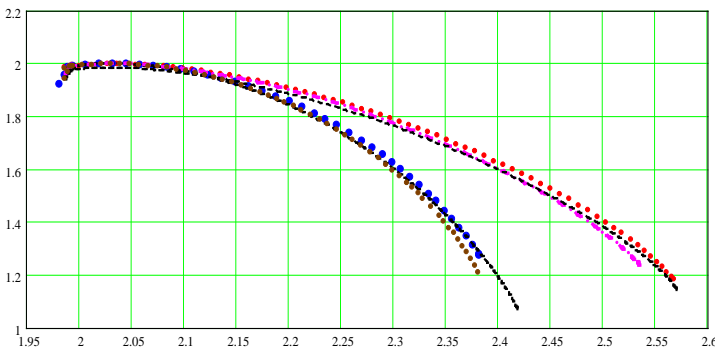


Рис. 17. Спектри фрактальних розмірностей  $f(\alpha)$  листяних покривів у зонах покладів та поза покладами нафти (Східні Рогинці)

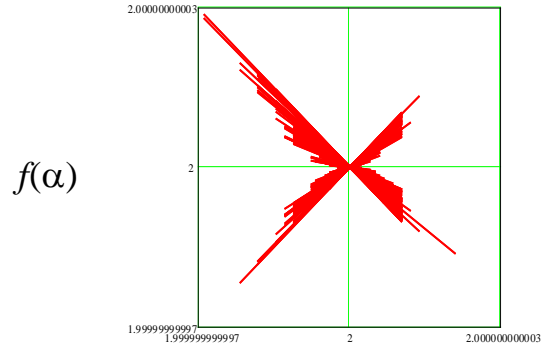


Рис. 18. Спектр розмірностей однорідного розподілу стягнутий у точку:  $\alpha=2, f(\alpha)=2$

Графіки побудовані при значеннях  $kv=100, L > 70000, -10 \leq q \leq 10, hq = 0,01$ . Варіабельність спектра розмірностей визначається за різницею значень показника

Ліпшиця-Гельдера  $\delta = \alpha_{\max} - \alpha_{\min}$ . Мультифрактал гіперспектральних відбиттів слід розглядати як множину однорідних фракталів, кожний з яких характеризується своєю розмірністю Хаусдорфа  $f(\alpha)$ . Якщо всі розмірності мультифрактала рівні, то розподіл квантів по ячейках однорідний, і спектр розмірностей однорідного розподілу стягнутий у точку (рис.18). Емпірично встановлений той факт, що варіабельність  $\delta$  для листяного покриву в зонах аномалій, викликаних покладами вуглеводнів, суттєво відрізняється від показника варіабельності  $\delta$  поза покладами. Теоретичним обґрунтуванням цього факту служить зміна фізіологічного стану рослин під дією вуглеводневих аномалій. У синергетиці розглядаються відкриті системи, які формують квазістійкі дисипативні структури далеко від стану рівноваги замкнених систем. Стан рівноваги характеризується однорідним розподілом. Ентропія однорідного розподілу максимальна та визначається як

$$H_{\max} = - \sum_{i=1}^{N(r)} p_i \ln p_i = \ln N(r). \text{ У цьому випадку мультифрактальна структура}$$

розпадається (рис. 18), і вироджується в однорідний фрактал. Приймаючи цей стан за найгірший фізіологічний стан рослин можна оцінити стан гомогенної рослинності показником варіабельності  $\delta$ .

**У сьомому розділі** – *“Оцінка періодичності гіперспектрального моніторингу території України з космічних апаратів”*, який складається з 7 підрозділів, проведено статистичну оцінку розривів у спостереженнях за об'єктами, розташованими на території України, гіперспектральною оптико-електронною системою (ОЕС) з КА, який перебуває на квазіоптимальній сонячно-синхронній орбіті. Дослідження допускають, що система управління платформою КА реалізує режим наведення ОЕС на об'єкти зйомки. Сектори кутів відхилення лінії візування ОЕС від напрямку в надир становлять  $\pm 30^\circ$  уздовж і впоперек площини орбіти. Оцінка розривів у спостереженнях виконується способом статистичного моделювання за критеріями максимального, мінімального й середнього часу повторного огляду об'єктів. Обчислення статистичних характеристик покриття передбачає створення в процесі комп'ютерного моделювання по всій поверхні території України рівномірної модельної сітки з кроком  $0,50^\circ$  (55,6 км), що складається з точкових об'єктів спостережень. Моделюється орбітальний рух одиночного КА, визначаються траси на обертовому еліпсоїді Землі, і по заданих кутах огляду бортової апаратури відслідковуються характеристики огляду кожної точки модельної сітки. Моделювання руху КА здійснювалося на квазіоптимальній для спостереження орбіті:  $i=98,5413^\circ$ ;  $\Omega=234,7696^\circ$ ;  $H=784,2$  км;  $u=0$ ;  $\gamma=\alpha=30^\circ$ ; де  $i$  – нахил орбіти,  $\Omega$  – довгота висхідного вузла,  $H$  – висота,  $u$  – аргумент широти,  $\gamma$  – бортовий кінцевий кут огляду,  $\alpha$  – мінімальний кут Сонця, при якому можливе ГДЗ. Моделювання показало, що середній час розривів у спостереженнях за об'єктами на території України становить 2,3 доби. Отже, односпутникова моніторингова КС ГДЗ у режимі перенацілювання буде ефективною для використання в оперативних тематичних природоохоронних і ресурсних завданнях.

**У восьмому розділі** – *“Організація адаптивного управління аерокосмічним моніторингом; основи візуального управління”* – обґрунтовано принцип побудови системи адаптивного управління космічним моніторингом, розроблено математичну

модель автоматизації візуального управління гіперспектральним моніторингом з БПЛА.

Для опису функціонування рухомих об'єктів адаптивного типу, в контурах управління якими є пристрої технічного зору, академіком НАНУ А.І. Кухтенком було запропоновано використовувати математичний апарат абстрактної алгебри. Основні положення цієї теорії представлені в спільній доповіді з автором дисертації на симпозиумі IFToMM (International Federation for the Promotion of Mechanism and Machine Science) [24]. В наступних роботах дисертанта [15-20, 22, 35, 37] управління такими об'єктами отримало назву "візуальне управління". В даний час, у зв'язку з розвитком інформаційних технологій ГДЗ, багато застосувань цієї теорії стають актуальними.

Під адаптивними системами геомоніторингу слід розуміти системи спостереження з ЛА, які для досягнення поставленої мети автоматично змінюють алгоритм свого функціонування та свою структуру в залежності від результатів спостережень. Реалізація адаптивного управління системою космічного моніторингу передбачає автоматичну класифікацію об'єктів на борту КА за даними ГДЗ середньої розрізненості, виділення об'єктів інтересу, визначення їх координат в земній системі, перенацілювання апаратури зондування на об'єкти інтересу з одночасним перемиканням режиму середньої розрізненості на детальне зондування. У наземні центри оброблення інформації ГДЗ передаються дані лише детального зондування площ з об'єктами інтересу. В даний час в КА ДЗЗ наведення оптичної системи на об'єкт зйомки за встановленими координатами цілі здійснюється шляхом розвороту корпусу КА в напрямку оптичної осі на ціль. Для розвороту в якості виконавчих органів використовують двигуни-маховики, які встановлюються в корпусі КА, а необхідні для управління і стабілізації поточні параметри руху КА визначаються бортовою інформаційною вимірювальною системою. У розділах 2-5 здійснено обґрунтування, розроблення та наведено приклади реалізації методів автоматизованої класифікації об'єктів та їх станів за гіперспектральними даними оптичного діапазону, що робить можливим на сучасному рівні розвитку систем управління КА застосування для низки пошукових завдань режиму адаптивного управління гіперспектральним моніторингом. Такий спосіб реалізації адаптивного управління передбачає досить точну координатну прив'язку об'єктів на космічних знімках, яка вимагає періодично проводити в процесі польоту геометричне калібрування спільних показань систем орієнтації ЛА з фактичним напрямком оптичної осі.

У підрозділі 8.1 зазначається, що застосування космічних систем ГДЗ та авіаційних комплексів у випадках зйомки протяжних об'єктів та малих за площею територій, стає малорентабельним, і альтернативною перспективою стає ГДЗ з БПЛА. Для ефективного застосування БПЛА необхідне створення недорогої, малогабаритної, досить точної бортової системи автоматичної стабілізації руху та керування процесом ГДЗ. Бортова система автоматичного управління режимом зйомки повинна застосовуватися спільно з напівавтоматичним керуванням БПЛА, яке здійснюватиметься оператором дистанційно. У підрозділі 8.2 формулюється постановка задачі візуального управління стосовно БПЛА.

*Візуальна обстановка* (ВО) – відображення зовнішнього стосовно ЛА середовища способом центрального проектування на площину зображення (картинну площину). Відображення зовнішнього середовища і формування зображень може здійснюватися різними технічними пристроями в різних діапазонах випромінювання електромагнітних хвиль. *Візуальне управління ЛА* – це процес формування керуючих впливів за інформацією, що міститься в зображеннях ВО.

*Вербальна постановка задачі.* На борту БПЛА крім гіперспектрометра є жорстко закріплена цифрова камера, яка фіксує поточне зображення ВО (рис. 22 б). Потрібно сформуванати керуючі впливи (сили, моменти) для того, щоб БПЛА набув положення, яке відповідає зображенню ВО, наведеному на рис. 22 а. Необхідно ліквідувати неузгодженість в розташуванні та орієнтації БПЛА за інформацією, яка міститься в послідовності кадрів ВО.

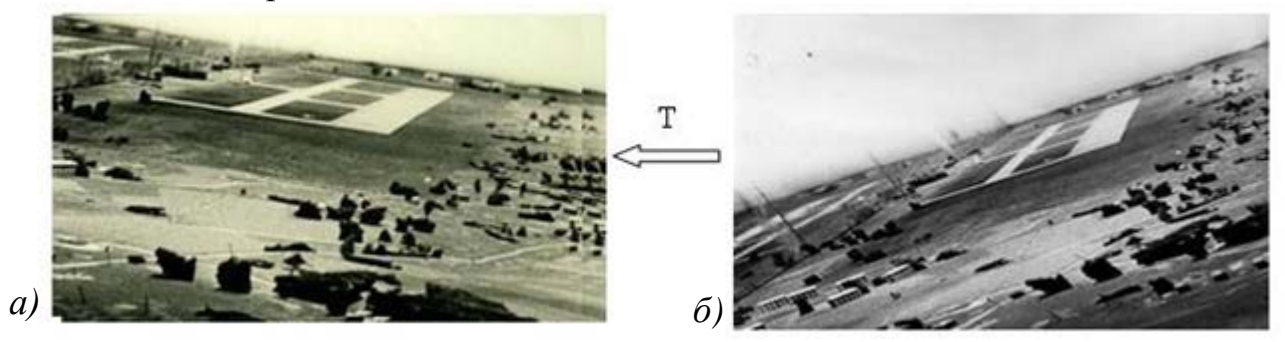


Рис. 22. Кадри зображення відповідної ділянки ВО з борту БПЛА

Вирішення цього завдання передбачає: 1) визначення виду перетворень  $T$ , що зв'язують ділянки зображень, які мають один прообраз на площині землі (відповідні ділянки); 2) формування за параметрами перетворення  $T$  керуючих впливів на органи управління БПЛА.

*Математична постановка задачі.* Об'єкт управління представлений динамічною системою  $d\mathbf{X}(t)/dt = \mathbf{F}[\mathbf{X}(t), \mathbf{u}(t)]$ , де  $\mathbf{X}(t)$  – вектор стану системи,  $\mathbf{u}(t)$  – вектор управління. Нехай в момент часу  $t_0$  об'єкт управління знаходиться в стані  $\mathbf{X}(t_0) \neq 0$ . Потрібно знайти такий керуючий вплив  $\mathbf{u}(t)$ , залежний від початкового стану  $\mathbf{X}(t_0)$ , який приводив би об'єкт у початок координат простору стану, тобто  $\mathbf{X}[t_1; t_0, \mathbf{X}(t_0), \mathbf{u}(t)] = 0$ , перехід повинен здійснюватися за скінченний час  $t_1 - t_0 > 0$  або в асимптотичному сенсі:  $\mathbf{X}[t_1; t_0, \mathbf{X}(t_0), \mathbf{u}(t)] \rightarrow 0$  при  $t \rightarrow \infty$ . Необхідно знайти керуючу функцію, яка задовольняє умовам: а) управління формуються за зображеннями ВО згідно цілей управління; б) необхідно забезпечити стійкість руху. Керуюча функція  $\mathbf{u}(t)$ , знаходиться у вигляді функції від виходів системи:  $\mathbf{u}(t) = \mathbf{u}[t, \varphi(t)]$ , де  $\varphi(t) = \rho(\mathbf{X}(t))$  – рівняння виходів системи. Компоненти векторної функції виходів  $\varphi(t)$  підлягають вимірюванню в процесі управління і характеризують вектор поточного стану  $\mathbf{X}(t)$  системи. Реалізація такого підходу пов'язана з організацією управління системою за **принципом зворотного зв'язку**. В задачах візуального управління векторна функція від виходів системи замінюється моделлю ВО на проєктивній площині, однак, зберігається принцип зворотного зв'язку, розглянутий вище. Такому визначенню відповідає поняття «**візуальний зворотний зв'язок**» (ВЗЗ). Наведено структурну схему реалізації принципу ВЗЗ при



множину проєктивних перетворень  $P$  точок картинної площини  $\Pi'$ . В системі введених неоднорідних координат на картинній площині  $O_k Y_k Z_k$ , перетворення відповідних точок  $\mathbf{t}(z_k, y_k) = (z'_k, y'_k)$  належать восьмипараметричній групі проєктивних перетворень  $P$

$$z'_k = \frac{a_1 z_k + a_2 y_k + a_3}{a_4 z_k + a_5 y_k + 1}, \quad y'_k = \frac{a_6 z_k + a_7 y_k + a_8}{a_4 z_k + a_5 y_k + 1}.$$

Мінімальна кількість точок зображення, необхідних для визначення за їх координатами на площині  $\pi'$  восьми параметрів групи визначається як рухливий репер групи. За репер групи  $P$  приймається 4 точки зображення, жодні 3 з яких не лежать на одній прямій. Будь-яке перетворення  $p$  однозначно визначене, якщо відомі координати 4-х реперних точок двох положень рухомого репера на картинній площині. Параметри перетворення  $\{a_1, a_2, \dots, a_8\}$  визначаються з розв'язку системи рівнянь

$$z_i a_1 + y_i a_2 + a_3 - (z'_i z_i) a_4 - (z'_i y_i) a_5 = z'_i, \quad -(y'_i z_i) a_4 - (y'_i y_i) a_5 + z_i a_6 + y_i a_7 + a_8 = y'_i; \\ i = 1, 2, \dots, 4.$$

Позначимо параметричний простір групи рухів  $G$  через  $W$ , параметричний простір групи проєктивних перетворень  $P$  – через  $U$  з елементами  $(a_i)_{i=1}^8$ . Відображення  $\tau$  простору параметрів  $W$  групи  $G$  в простір параметрів  $U$  дозволяє визначити місце розташування та орієнтацію тіла за зображеннями реперних точок на картинній площині  $\tau: W \rightarrow U$ . Наведено співвідношення відображення  $\tau$  в явному вигляді. Відображення обернене, що дозволяє визначити місце розташування і орієнтацію ЛА за параметрами проєктивних перетворень  $p$  (див. рис. 23). Розглянуто окремі випадки відображень обертально-поступального руху БПЛА на картинну площину, наводиться таблиця орбіт однопараметричних груп на картинній площині для окремих базисних випадків руху. Наведено виведення кінематичних рівнянь обертального руху БПЛА як твердого тіла в термінах параметрів проєктивних перетворень реперних точок на картинній площині. Диференціальні рівняння пов'язують параметри проєктивної групи  $\{a_3, a_6, a_8\}$  з кутовими швидкостями  $\{\omega_x, \omega_y, \omega_z\}$  БПЛА

$$\dot{a}_3 = -a_8 \omega_x + \frac{B^2}{r} \omega_y - \frac{a_3}{r} \omega_z, \quad \dot{a}_6 = \left( \frac{sA}{B^2} - \frac{a_3 a_6 a_8}{B^2} \right) \omega_x + \frac{a_3 a_6}{r} \omega_y + \left( \frac{a_3 s A}{B^2 r} - \frac{a_6 a_8 a_3^2}{B^2 r} \right) \omega_z, \\ \dot{a}_8 = \left( \frac{a_3^2}{B^2} - \frac{a_3^2 a_8^2}{B^2} \right) \omega_x + \frac{a_3 a_8}{r} \omega_y - \left( \frac{r s^2}{B^2} + \frac{a_3^2 a_8^2}{B^2 r} \right) \omega_z. \quad (31)$$

де  $A^2 = a_3^2 + r^2 - a_6^2 r^2$ ,  $B^2 = a_3^2 + r^2$ ,  $s^2 = a_8^2 + a_3^2 + r^2$ ,  $r$  – відстань від центру проєктування до картинної площини. Рівняння є аналогом кінематичних рівнянь Ейлера на проєктивній площині. У підрозділі 8.4 здійснено синтез керуючих впливів візуального управління обертальним і обертально-поступальним рухом БПЛА як твердого тіла за переміщенням відображень реперних об'єктів на проєктивній

(картинній) площині зображення. Викладено методику застосування другого методу Ляпунова для синтезу здійснено синтез керуючих впливів візуального управління в кінематичній і динамічній постановці. Наприклад, синтез візуального управління орієнтацією об'єкта, представленого кінематичними рівняннями (31) для твердого тіла на проєктивній площині, проводиться за наступною схемою. Компоненти  $a_3(t)$ ,  $a_6(t)$ ,  $a_8(t)$  підлягають вимірюванню в процесі управління і характеризують неузгодженість у візуальних картинах. Рівність нулю параметрів означає, що об'єкт управління набув у просторі заданого положення, а базис  $\mathbf{E}$  збігається з опорним  $\mathbf{I}$ . Вектор  $\mathbf{u}=[\omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$  є управлінням, яке задається в осях пов'язаної з тілом СК, система управління регулює величини проєкції кутової швидкості  $\boldsymbol{\omega}$  на осі тіла. Будується функція  $W$ , що залежить від фазових змінних  $a_3(t)$ ,  $a_6(t)$ ,  $a_8(t)$  системи (31), така, що обертається в нуль лише за умови збігу базисів  $\mathbf{E}$  і  $\mathbf{I}$ . При всіх інших положеннях базисів функція (32) повинна мати додатне значення. Похідна за часом від цієї функції, яка взята з урахуванням рівнянь руху, повинна бути від'ємно-визначеною функцією (33). У цьому випадку положення рівноваги системи (31) буде стійким:

$$W = \frac{1}{2}(a_3^2 + a_6^2 + a_8^2), \quad (32)$$

$$\begin{aligned} \dot{W} = a_3 \dot{a}_3 + a_6 \dot{a}_6 + a_8 \dot{a}_8 = & \frac{1}{B^2}(-B^2 a_8 a_3 + a_6 s A - a_8 a_3 a_6^2 + a_8 a_3 s^2 - a_8^3 a_3) \omega_x + \\ & + \frac{a_3}{r}(B^2 + a_6^2 + a_8^3) \omega_y + \frac{1}{r B^2}(-B^2 a_8 a_3^2 + a_3 a_6 s A - a_8 a_3^2 a_6^2 - a_8 s^2 r^2 - a_8^3 a_3^2) \omega_z. \end{aligned} \quad (33)$$

Управління компонентами кутової швидкості  $\boldsymbol{\omega}$  вибираємо так, щоб  $\dot{W}$  була безумовно від'ємно-визначеною функцією:

$$\begin{aligned} \omega_x &= -k_{\omega x} \frac{1}{B^2}(-B^2 a_8 a_3 + a_6 s A - a_8 a_3 a_6^2 + a_8 a_3 s^2 - a_8^3 a_3), \\ \omega_y &= -k_{\omega y} \frac{a_3}{r}(B^2 + a_6^2 + a_8^3), \\ \omega_z &= -k_{\omega z} \frac{1}{r B^2}(-B^2 a_8 a_3^2 + a_3 a_6 s A - a_8 a_3^2 a_6^2 - a_8 s^2 r^2 - a_8^3 a_3^2). \end{aligned} \quad (34)$$

При  $\{k_{\omega x}, k_{\omega y}, k_{\omega z}\} > 0$  похідна  $\dot{W}$  є безумовно від'ємно-визначеною формою всюди, крім орієнтованого положення. Управління (34) забезпечує збіжність процесу управління до положення рівноваги. Для динамічної стійкості процесу корекції до закону управління вводяться демпфовані складові, що містять кутову швидкість, при певній залежності управління від кінематичного керування. У разі візуального управління орієнтацією роль демпфованих складових виконують похідні від параметрів  $\{\dot{a}_3, \dot{a}_6, \dot{a}_8\}$ . Топологічні властивості проєктивної площини характеризують картинну площину як двовимірне різномоніття, що дозволяє коректно вводити операцію диференціювання. Для динамічної задачі управління функцію Ляпунова знаходимо у вигляді  $T = Q + W$ , де  $W$  – «кінематична» функція Ляпунова виду (32). Функція  $Q$  визначається динамічними рівняннями Ейлера  $\mathbf{J}\dot{\boldsymbol{\omega}} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{J}\boldsymbol{\omega} = \mathbf{M}$ , де  $\mathbf{J}$  – матриця інерції,  $\mathbf{M}$  – керуючий момент,  $Q$  дорівнює

кінетичній енергії тіла  $Q = \frac{1}{2}(J_{xx}\omega_x^2 + J_{yy}\omega_y^2 + J_{zz}\omega_z^2)$ . Функція  $T$ , яка дорівнює  $T = \frac{1}{2}(J_{xx}\omega_x^2 + J_{yy}\omega_y^2 + W)$ , додатно-визначена і має один нуль в орієнтованому положенні. При збігу базисів  $\mathbf{I}$  і  $\mathbf{E}$ :  $\omega_x = \omega_y = \omega_z = 0$ ,  $W = 0$ . Для визначення похідної  $\dot{T}$  значення  $\dot{\omega}_x, \dot{\omega}_y, \dot{\omega}_z$  знаходяться з динамічних рівнянь Ейлера, потім остаточно знаходиться  $\dot{T} = M_x\omega_x + M_y\omega_y + M_z\omega_z + \dot{W}$ , де  $\dot{W}$  визначене виразом (33). При значеннях коефіцієнтів підсилення  $q_i = 1$ ,  $h_i > 0$ ,  $i = 1, 2, 3$  і керуючих моментах виду (35) похідна  $\dot{T}$  від'ємно-визначена і обертається в нуль в положенні необхідної орієнтації. Візуальне динамічне управління орієнтацією твердого тіла керуючими моментами, які формуються за законом (35) вимагає інформації про проекції вектора кутової швидкості. Для реалізації управління рухомих об'єктом це пов'язано з установкою сенсорів кутових швидкостей.

$$\begin{aligned} M_x &= -h_1 \omega_x - q_1 \frac{1}{B^2} (-B^2 a_8 a_3 + a_6 s A - a_8 a_3 a_6^2 + a_8 a_3 s^2 - a_8^3 a_3), \\ M_y &= -h_2 \omega_y - q_2 \frac{a_3}{r} (B^2 + a_6^2 + a_8^3), \\ M_z &= -h_3 \omega_z - q_3 \frac{1}{r B^2} (-B^2 a_8 a_3^2 + a_3 a_6 s A - a_8 a_3^2 a_6^2 - a_8 s^2 r^2 - a_8^3 a_3^2). \end{aligned} \quad (35)$$

Отримати повністю автономну систему візуального управління можливо, якщо виразити кутові швидкості через похідні параметрів проективної групи. Цей випадок детально розглянуто в дисертаційній роботі. У підрозділі 8.5 та додатку Е наведені результати комп'ютерного моделювання візуального управління за допомогою розробленої експериментальної обчислювальної системи. На рис. 24 наведено результат моделювання кінематичного управління обертально-поступальним рухом об'єкта.

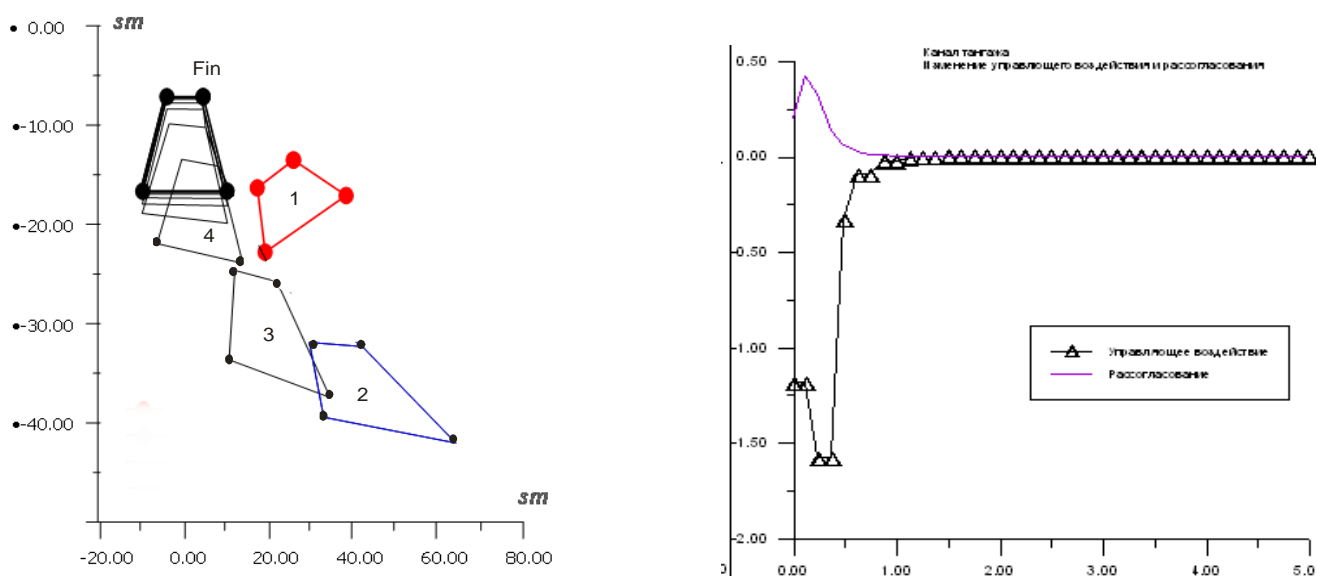


Рис. 24. Управління переміщенням рухомого об'єкта в просторі до заданого положення Fin за реперними точками на картинній площині і перехідні процеси в каналі тангажу. Керуючий вплив:  $\Delta$ , (рад/с); неузгодженість в положенні об'єкта:  $-$  (рад)

## ВИСНОВКИ

У дисертації наведено теоретичне обґрунтування і запропоновано нове вирішення комплексної наукової проблеми розробки статистичних моделей для опису структури спектральних даних, методів оброблення та інтерпретації результатів аерокосмічного гіперспектрального геомоніторингу та методів управління моніторингом для підвищення ефективності застосування гіперспектральних технологій при вирішенні природоохоронних та ресурсних задач. Основні результати дисертації відображені у таких висновках:

1. На основі аналізу технічної суті процесів формування, дешифрування та інтерпретації великих обсягів даних детального гіперспектрального аерокосмічного геомоніторингу розроблено обчислювальні методи для автоматизації тематичного оброблення та експрес-оброблення даних, що можуть застосовуватися на борту ЛА. Автоматизація оброблення даних гіперспектрального дистанційного зондування (ГДЗ) знижує трудомісткість процесу, підвищує оперативність та достовірність отриманих результатів. Можливість оброблення гіперспектральних даних на борту ЛА дозволить застосувати для вирішення пошукових моніторингових завдань системи аерокосмічного геомоніторингу адаптивного типу.

2. Розроблення методів дешифрування результатів ГДЗ проведено з урахуванням специфіки спектрального аналізу – відображати хімічну (біохімічну) структуру матеріалу об'єкта зондування в структурі спектра відбиттів. Для опису структури спектрів *вперше* здійснено синтез трьох базових математичних моделей: неперервно-групової, фрактальної, мультифрактальної. Кожна модель використовує свій математичний апарат обчислень інваріантів степеневих розподілів, що дозволило описати структуру спектра як відношення між спектральними інтенсивностями в термінах інваріантів. Такий підхід формалізує та обґрунтовує коректність виведення обчислювальних методів як процедур ідентифікації моделей за даними ГДЗ. Інваріанти та методи їх обчислень, що пройшли верифікацію, застосовані як індикаторні ознаки об'єктів та їх станів.

3. *Вперше* проведено математичну постановку задачі сегментації і класифікації даних ГДЗ за масштабними інваріантами степеневих розподілів і фрактальними розмірностями (інваріантами) спектрів відбиттів.

4. *Вперше* синтезовано і верифіковано неперервно-групову модель симетрії степеневих розподілів гіперспектральних відбиттів природних об'єктів і метод ідентифікації моделі за даними ГДЗ, а саме:

4.1. Метод ідентифікації структури і параметрів неперервно-групової моделі, який заснований на математичному апараті теорії груп Лі і обчисленні кратних подвійних інваріантів (КПІ) симетрії степеневих розподілів спектральних інтенсивностей.

4.2. Методи обчислень кумулятивних функцій розподілів з контрольованою точністю та обчислень КПІ за кумулятивними функціями степеневих розподілів.

4.3. За даними спектральних відбиттів рослин і рослинних покривів *вперше* ідентифіковано на значних інтервалах спектральних інтенсивностей степеневі частотні розподіли типу Ципфа-Парето, що характеризує аналогічний розподіл хімічного, біохімічного, мінерального складу в структурі об'єктів зондування.

4.4. На експериментальному матеріалі проведено верифікацію неперервно-групової моделі спектрів відбиттів, яка показала, що КПІ характеризує фізіологічний стан рослинних покривів і може використовуватися як індикаторна ознака і чисельний критерій в задачі пошуку покладів вуглеводнів способами дистанційної та контактної спектрометричної фітоіндикації. Порогова сегментація даних ГДЗ за індикаторною ознакою КПІ ділянок родовищ з глибоким заляганням вуглеводнів дозволяє виділяти області, перспективні для проведення бурових робіт.

4.5. Для аналізу гіперспектральних зображень (ГСЗ) розроблено методику автоматизованої сегментації і класифікації об'єктів методом апроксимації кратних подвійних інваріантів розподілів. Методика верифікована на ГСЗ середньої просторової та спектральної розрізненності (30 м/п, 10 нм) м.Києва з EO-1 "Hyperion". Метод КПІ та методика можуть бути використані для автоматизації комплексної оцінки антропогенних змін територій за ГСЗ. Метод КПІ може бути використаний в контурах управління адаптивних систем аерокосмічного геомоніторингу при виконанні пошукових завдань. У цьому випадку моніторинг проводиться з середньою розрізненністю та автоматичним обчисленням КПІ; при виявленні за КПІ об'єктів інтересу активізується режим перенацілювання сенсора, який виконується розворотом корпусу ЛА, і здійснюється детальне ГДЗ об'єкта; в наземний центр передаються лише дані детального ГДЗ.

5. *Вперше* синтезовано неоднорідну фрактальну модель спектрів відбиттів, в рамках якої набули подальшого розвитку модифікації методів обчислень фрактальних розмірностей, а саме:

5.1. Метод обчислення фрактальних розмірностей локальної структури спектрів.

5.2. Метод експрес-оцінок фрактальних розмірностей спектрів. Метод може використовуватися для обчислення на борту КА фрактальних розмірностей спектрів підстильної поверхні зондування, що призводить до значного (від 200 до 1000 разів) скорочення обсягів цільової інформації, яка передається для подальшої фрактальної сегментації даних та інтерпретації результатів.

5.3. Для проведення фрактальної сегментації та інтерпретації даних розроблено обчислювальний метод та методику побудови поля та середнього за спектром поля фрактальних розмірностей ГСЗ. Цим методом здійснюється побудова та аналіз поля індикаторної ознаки – фрактальних розмірностей просторово-спектральної структури підстильної поверхні. Скалярне поле індикаторної ознаки є досить гладким для однорідних об'єктів, але зазнає значних стрибків або розривів на об'єктах різної структури. Однорідні за складом об'єкти мають близькі значення фрактальних розмірностей, що дозволило використовувати фрактальну розмірність як критерій та індикаторну ознаку для сегментації даних. Метод і методика представлені у вигляді способу фрактальної спектрометричної фітоіндикації виявлення аномалій природного та техногенного походження. Застосування способу продемонстровано на прикладах розв'язання задач пошуку нафти і газу, визначення та уточнення меж покладів вуглеводнів; спосіб верифікований в районах геологічних аномалій та підземного сховища газу.

6. *Вперше* виявлено мультифрактальну структуру гіперспектральних відбиттів листя та листяних покривів, що дозволило:

а) побудувати мультифрактальну модель гіперспектральних відбиттів, яка базується на визначенні ентропії Реньї розподілів;

б) провести мультифрактальний аналіз гіперспектральних відбиттів листяних покривів в зонах геологічних аномалій.

6.1. Експериментально підтверджено, що варіабельність показника Ліпшиця-Гельдера мультифрактального спектру є індикаторною ознакою фізіологічного стану рослинних покривів. У зоні аномалій, викликаних концентрацією природного газу і нафти, варіабельність показника зменшується та досягає мінімуму при однорідному розподілі інтенсивностей гіперспектральних відбиттів.

7. Методом статистичного комп'ютерного моделювання проведено оцінювання періодичності повторного огляду об'єктів на території України з квазіоптимальної для спостережень сонячно-синхронної орбіти КА в режимі перенацілювання. Показано, що середній час повторного огляду об'єктів становить 2,3 доби. Отже, односпутникова моніторингова КС ГДЗ в режимі перенацілювання буде ефективною для використання в тематичних завданнях ДЗЗ з короткими розривами в спостереженнях за об'єктами.

8. Загальна тенденція розвитку ГДЗ з повітряних носіїв дозволяє прогнозувати масове застосування БПЛА з гіперспектральними сенсорами для детального зондування локальних територій. Необхідною умовою реалізації є вимога прецизійної просторової стабілізації щілинного гіперспектрометра і носія, які працюють в умовах турбулентності атмосфери. Реалізація розвинених в дисертації методів візуального управління БПЛА дозволить відмовитися від важких гіростабілізованих платформ, на які встановлюються авіаційні гіперспектрометри, і замінити їх аналітичними платформами, що працюють за принципом візуальних зворотних зв'язків. Реалізація принципів візуального управління і стабілізації режимами зйомки відкриває нові можливості для використання ГДЗ з БПЛА.

Комплексне використання розроблених методів і методик ГДЗ сприятиме підвищенню ефективності гіперспектральних технологій в аерокосмічних дистанційних дослідженнях. Виходячи з досвіду проведених робіт, слід вважати перспективним подальший прикладний розвиток розроблених методів у тематичних завданнях ДЗЗ та управлінні геомоніторингом.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

*Наукові праці у яких опубліковані основні наукові результати дисертації:*

1. Артюшенко М. В. Фрактальний аналіз спектрограмм растительного покрова в задачах природопользования / М. В. Артюшенко, Л. В. Подгородецкая, А. Д. Федоровский // Доповіді Національної академії наук України. – 2010. – № 8. – С. 113–119.

2. Артюшенко М. В. Мультифрактальний аналіз біорізноманітності і ценотичної структури сообщества растений по данным дистанционного зондирования / М. В. Артюшенко, Л. Н. Зуб, Л. В. Подгородецкая, А. Д. Федоровский // Доповіді Національної академії наук України. – 2011. – №9. – С. 132–141.

3. Федоровский А.Д. Методы фрактальной геометрии при дешифрировании ландшафтных комплексов на космических снимках / А.Д. Федоровский, В.Г. Якимчук, О.В. Никитенко, М.В. Артюшенко, С.А. Рябоконеко // Доповіди Національної академії наук України. – 2002. – № 9. – С. 119–124.

4. Спосіб фрактальної спектрометричної фітоіндикації виявлення аномалій природного та техногенного походження [Текст] : ПАТЕНТ на винахід № 104360 / Артюшенко М.В., Дугін С.С., Федоровський О.Д. : власник патенту ДУ “Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України”. – № а 2012 09155; заявл. 25.07.2012; опубл. 27.01.2014, Бюл. № 2 – 1 с.

5. Артюшенко М.В. / Компьютерные методы исследования фрактальных свойств систем с хаотической динамикой / М.В. Артюшенко, О.В. Никитенко // Проблемы управления и информатики. – 1998. – № 4. – С. 17-28.

6. Артюшенко М.В. Применение метода целочисленной арифметики в задачах цифровой обработки сигналов / М.В. Артюшенко // Кибернетика и вычислительная техника : Респуб. межвед. сб. науч. тр. / АН УССР, Ин-т кибернетики. – К. : Наукова думка, 1987. – вып. 73. – С. 55-61.

7. Артюшенко М.В. Реализация передаточных функций методом целочисленной арифметики / М.В. Артюшенко // Кибернетика и вычислительная техника : Респуб. межвед. сб. науч. тр. / АН УССР, Ин-т кибернетики. – К. : Наукова думка, 1984. – вып. 62. – С. 63-67.

8. Артюшенко М.В. Вычисление орбит групп преобразований динамических систем / М.В. Артюшенко // Кибернетика и вычислительная техника : Респуб. межвед. сб. науч. тр. / АН УССР, Ин-т кибернетики. – К. : Наукова думка, 1987. – вып. 75. С. 74-77.

9. Артюшенко М.В. Пакет прикладных программ для автоматизации проектирования нелинейных характеристик / М.В. Артюшенко, О.П. Петров // Кибернетика и вычислительная техника : Респуб. межвед. сб. науч. тр. / АН УССР, Ин-т кибернетики. – К. : Наукова думка, 1982. – вып. 56. – С. 73-77.

10. Артюшенко М.В. Об одном численном методе описания инвариантных решений динамических систем / М.В. Артюшенко // Кибернетика и вычислительная техника : Респуб. межвед. сб. науч. тр. / АН УССР, Ин-т кибернетики. – К. : Наукова думка, 1981. – вып. 51. – С. 79-84.

11. Артюшенко М.В. Абстрактно-алгебраические методы распознавания многогранников и определение их ориентации в пространстве / М.В. Артюшенко // Кибернетика и вычислительная техника : Респуб. межвед. сб. науч. тр. / АН УССР, Ин-т кибернетики. – К. : Наукова думка, 1975. – вып. 27. – С. 101-109.

12. Артюшенко М.В. Моделирование и синтез орбитальной группировки космических аппаратов зонального наблюдения территории Украины / М.В. Артюшенко, С.С. Дугин, А.Д. Федоровский // Космічна наука і технологія. – 2011. – Т. 17, № 5. – С. 50-57.

13. Федоровский А.Д. Параметрический синтез космических систем зондирования Земли на основе генетического метода: постановка задачи и пути решения / А.Д. Федоровский, З.В. Козлов, М.В. Артюшенко // Космічна наука і технологія. – 2004. – Т.10, №1. – С. 54-60.

14. Артюшенко М.В. Экономико-математические методы анализа и модели оптимизации информационных систем по качественным характеристикам / М.В. Артюшенко, Н.М. Артюшенко // Проблемы управления и информатики. – 2006. – №3. – С. 129-146.

15. Artyushenko M.V. Foundations of synthesis of visual control algorithms for a moving object / M.V. Artyushenko // Cybernetics and Computing Technology. NY. : Allerton Press Inc. – 1996. Num. 104, P. 34-39.

16. Артюшенко М.В. Динамическая задача визуального управления ориентацией / М.В. Артюшенко // Кибернетика и вычислительная техника : Межвед. сб. науч. тр. / НАНУ, Ин-т кибернетики им. В.М. Глушкова. – 1997. – вып. 108. – С. 46-54.

17. Артюшенко М.В. Абстрактно-алгебраические методы в определении параметров движения твердого тела / М.В. Артюшенко // Кибернетика и вычислительная техника : Респуб. межвед. сб. науч. тр. / АН УССР, Ин-т кибернетики. – К. : Наукова думка, 1983. – вып. 58. – С. 56-64.

18. Артюшенко М.В. Информационные технологии визуального управления. Часть 1. Принципы организации / М.В. Артюшенко, Д.В. Лебедев, О.В. Никитенко, Н.К. Печурин // Проблемы управления и информатики. – 2002. – №6. – С. 132-139.

19. Артюшенко М.В. Информационные технологии визуального управления. Часть 2. Математические модели. Синтез алгоритмов / М.В. Артюшенко, Д.В. Лебедев, О.В. Никитенко // Проблемы управления и информатики. – 2003. – №1. – С. 129-142.

20. Артюшенко М.В. Управление кинематическими параметрами твердого тела по визуальной информации / М.В. Артюшенко // Кибернетика и вычислительная техника : Респуб. межвед. сб. науч. тр. / АН УССР, Ин-т кибернетики. – К. : Наукова думка, 1988. – вып. 77. – С. 56-62.

21. Артюшенко М.В. Разработка специальных методов моделирования управляемых динамических систем / М.В. Артюшенко // Кибернетика и вычислительная техника : Респуб. межвед. сб. науч. тр. / АН УССР, Ин-т кибернетики. – К. : Наукова думка, 1979. – вып. 43. – С. 8-12.

22. Артюшенко М.В. Моделирование систем автоматического управления на микро-ЭВМ / М.В. Артюшенко // Эргатические системы управления : сб. науч. тр. – К. : Ин-т кибернетики им. В.М. Глушкова. – 1985. – С.47–53.

23. Артюшенко М.В. Описание многообразия движений систем одного класса / М.В. Артюшенко // Кибернетика и вычислительная техника : Респуб. межвед. сб. науч. тр. / АН УССР, Ин-т кибернетики. – К. : Наукова думка, 1976. – вып. 31. – С. 61-63.

*Опубліковані праці апробаційного характеру:*

24. Artyushenko M.V. Abstract algebraic description methods of a functioning process of some kind of adaptive robots / M.V. Artyushenko, A.I. Kukhtenko, V.N. Semenov // First CISM (Centre International des Sciences Mecaniques) – IFToMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators, Udine, Italy 5-8 Sep. 1973.: Courses and Lectures № 201, On Theory and Practice of Robots and Manipulators, Vol. II Udine: Springer-Verlag Wien GmbH. – 1974. – P. 17-30. (*Особистий внесок: неперервно-групова модель визначення параметрів руху за інформацією в зображеннях.*)

25. Федоровский А.Д. Поисковое проектирование космических систем зондирования Земли / А.Д. Федоровский, З.В. Козлов, М.В. Артюшенко // Системный анализ и управление: тезисы докладов 9-й Международной конференции, (Евпатория, 4–11 июля 2004). – М. : Московский авиационный институт. – 2004. – С. 85-86. *(Особистий внесок: розробка методу і алгоритму.)*

26. Артюшенко М.В. Анализ динамики диссипативных структур геосистем с космических аппаратов / М.В. Артюшенко // Автоматика-2012: матеріали ХІХ Міжнародної конференції з автоматичного управління, (Київ, 26-28 вересня 2012). – К.: НУХТ. – 2012. – С. 140.

27. Артюшенко М.В. Экономико–математические модели анализа эффективности применения методов ДЗЗ / М.В. Артюшенко, Л.В. Підгородецька, Л.М. Колос // Можливості сучасних ГІС/ДЗЗ– технологій у сприянні вирішення проблем Черкащини: матеріали регіональної наради, (Черкаси, 29-30 червня 2006). –К.: НКАУ, 2006. – С. 40. *(Особистий внесок: методи розрахунків економічної ефективності використання ДЗЗ.)*

28. Подгородецкая Л.В. Фрактальный анализ спектров отражения растительности при гиперспектральном дистанционном зондировании / Л.В. Подгородецкая, М.В. Артюшенко, О.В. Никитенко, // Автоматика-2009: тези доповідей 16-ї Міжнародної конференції з автоматичного управління, (Чернівці, 22-25 вересня 2009). – Чернівці: Книги–ХХІ. – 2009. – С. 356–358. *(Особистий внесок: метод побудови полів фрактальних розмірностей спектральних відбиттів.)*

29. Подгородецкая Л.В. Исследования экологии внутренних водоемов по структуре фитоценозов, наблюдаемых с КА ДЗЗ / Л.В. Подгородецкая, М.В. Артюшенко, А.Д. Федоровский // 11-а Українська конференція з космічних досліджень: тези доповідей, (Євпаторія, 29 серп. - 2 вер. 2011). – К.: ІКД НАНУ-НКАУ. – 2011. – С. 76. *(Особистий внесок: мультифрактальна модель.)*

30. Артюшенко М.В. Непрерывно-групповые модели аттракторов систем с хаотической динамикой / М.В. Артюшенко, О.В. Никитенко // Автоматика-2000: праці Міжнародної конференції з автоматичного управління, (Львів, 11-15 вересня 2000). – Львів: Державний НДІ інформаційної інфраструктури. – 2000. – т.1. – С. 35–40. *(Особистий внесок: динамічна модель утворення фрактальних структур.)*

31. Артюшенко М.В. Синтез алгоритмов управления систем с визуальной обратной связью / М.В. Артюшенко // Автоматика-95: праці Другої Української конф. з автоматичного керування, (Львів, 26-30 вер. 1995). – Львів: Державний НДІ інформаційної інфраструктури. – 1995. – т.1. – С. 98.

32. Артюшенко М.В. Симметрия в математических моделях визуального управления. Синтез алгоритмов управления / М.В. Артюшенко // Автоматика-96: праці 3-ї Української конф. з автоматичного керування, (Севастополь, 9-14 вер. 1996). – Севастополь: СевГТУ. – 1996, т. 2. – С. 88.

33. Артюшенко М.В. Визуальное управление движением системами с элементами искусственного интеллекта / М.В. Артюшенко // Автоматика-97: матеріали 4-ї Української конф. з автоматичного управління за участю міжнародних спеціалістів, (Черкаси, 23-28 червня 1997). – Черкаси: ЧІТІ. – 1997, т. 2. – С. 70.

34. Федоровский А.Д. Параметрический синтез космических систем зондирования Земли с использованием генетических алгоритмов /

А.Д.Федоровский, М.В. Артюшенко // Третья Украинская конференция по перспективным космическим исследованиям, (Кацивели, Крым, 15-18 сентября 2003) : сборник тезисов. – К.: ИКИ НАНУ-НКАУ. – 2004. – С. 85-86. (*Особистий внесок: метод і алгоритм оптимізації.*)

35. Артюшенко М.В. Визуальное управление твердым телом / М.В. Артюшенко, О.В. Никитенко, В.Н. Семенов // Всесоюзная конференция по искусственному интеллекту, (Переславль-Залесский, 21-25 ноября 1988) : тезисы докладов. – М.: АН СССР. – 1988, т. 2, С. 135-140. (*Особистий внесок: розробка методу.*)

*Опубліковані праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:*

36. Артюшенко М.В. Исследование методов цифровой обработки сигналов / М.В. Артюшенко // Сложные системы управления : сб. науч. тр. – К. : Ин-т кибернетики им. В.М. Глушкова. – 1987. – С.4–10.

37. Артюшенко М.В. Модель искусственного интеллекта в задаче визуального управления твердым телом / М.В. Артюшенко // Сложные системы управления : сб. науч. тр. – К. : Ин-т кибернетики им. В.М. Глушкова. – 1989. – С.15–26.

## АНОТАЦІЯ

**Артюшенко М.В. Методи фрактального аналізу даних і управління аерокосмічним гіперспектральним геомоніторингом.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.07.12 – Дистанційні аерокосмічні дослідження. – Державна установа «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України».

Дисертація присвячена розробці методів автоматизації оброблення результатів гіперспектрального аерокосмічного геомоніторингу, дослідженню моделей опису структури спектральних даних і методів управління моніторингом для вирішення природоохоронних та природоресурсних завдань.

Розроблено моделі і методи оброблення гіперспектральної інформації та експрес-оброблення даних на борту літальних апаратів, розглянуто організацію адаптивного управління аерокосмічним моніторингом. Закладено основи синтезу систем автоматичного управління за принципом візуальних зворотних зв'язків для управління рухомими об'єктами з системою розпізнавання.

Для опису структурних особливостей спектрів відбиттів проведено синтез моделей: неперервно-групової, фрактальної, мультифрактальної. Наведено приклади розв'язання задач пошуку нафти і газу за спектрами відбиттів рослинного покриву, автоматизованої класифікації об'єктів на гіперспектральних зображеннях.

*Ключові слова:* гіперспектральне дистанційне зондування, методи класифікації даних, фрактальні структури, природні ресурси, адаптивне управління аерокосмічним моніторингом.

## АННОТАЦИЯ

**Артюшенко М.В. Методы фрактального анализа данных и управление аэрокосмическим гиперспектральным геомониторингом.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.07.12 – Дистанционные аэрокосмические исследования. –

Государственное учреждение «Научный центр аэрокосмических исследований Земли ИГН НАН Украины», Киев, 2015.

Диссертация посвящена методам автоматизации обработки результатов гиперспектрального аэрокосмического геомониторинга, исследованию моделей описания структуры спектральных данных и методов управления мониторингом для эффективного применения гиперспектральных технологий при решении природоохранных и природоресурсных задач.

Проведена разработка методов для экспресс-обработки гиперспектральной информации на борту ЛА и организации адаптивного управления мониторингом.

Разработаны методы дешифрирования результатов гиперспектрального дистанционного зондирования (ГДЗ), которые учитывают специфику спектрального анализа – отображать химическую (биохимическую) структуру материала объекта зондирования в структуре спектра отражений. Для описания структурных особенностей спектров проведен синтез трех базовых моделей: непрерывно-групповой, фрактальной, мультифрактальной. Каждая модель на своем математическом языке и уровне детализации описывает структуру в терминах масштабных инвариантов. Такой подход позволил описать структуры спектров в терминах инвариантов и обосновать корректность вывода вычислительных методов как процедур идентификации моделей по данным ГДЗ. По разработанным в диссертации методикам, которые прошли верификацию, инварианты и методы их вычислений применены как индикаторные признаки объектов и их состояний для автоматизированной классификации данных ГДЗ. Приведены примеры решения задач поиска нефти и газа по спектрам отражений растительного покрова, а также автоматизированной классификации объектов на гиперспектральных изображениях (ГСИ).

На основе проведенного синтеза непрерывно-групповой модели симметрии спектров отражений, с применением аппарата теории групп Ли и расширений групп, разработан метод определения кратных двойных инвариантов (КДИ) степенных распределений и вычисления КДИ по данным ГДЗ. Методом КДИ идентифицированы степенные распределения типа Ципфа-Парето в спектрах отражений растений. Установлено, что КДИ характеризует физиологическое состояние растительных покровов и может использоваться как индикаторный признак аномальных зон в задачах поиска залежей углеводородов (УВ).

Разработана методика автоматизированной сегментации и классификации объектов на ГСИ с космических аппаратов (КА) методом аппроксимации КДИ.

Проведен синтез неоднородной фрактальной модели спектров отражений, в рамках которой получили дальнейшее развитие модификации методов вычислений фрактальных размерностей локальной структуры спектров. Разработан метод построения и анализа поля фрактальных размерностей спектральных яркостей по ГСИ. Установлено, что скалярное поле фрактальных размерностей, отраженной от подстилающей поверхности спектральной интенсивности, является достаточно гладким для однородных объектов, но терпит значительные скачки на объектах разной структуры.

Проведен синтез мультифрактальной модели гиперспектральных отражений. Выявлена мультифрактальная структура отражений листового покрова деревьев.

Мультифрактальный анализ отражений светового потока листовым покровом в зонах геологических аномалий показал, что варибельность показателя Липшица-Гёльдера мультифрактального спектра является индикаторным признаком физиологического состояния лесной растительности. В зоне аномалий, вызванных концентрацией УВ, варибельность показателя уменьшается и достигает минимума при однородном распределении интенсивностей гиперспектральных отражений.

Произведен анализ периодичности просмотра произвольно расположенных объектов на территории Украины с квазиоптимальной для наблюдений солнечно-синхронной орбиты в режиме перенацеливания КА ГДЗ на объекты зондирования. Методом статистического компьютерного моделирования установлено, что среднее время повторного просмотра составляет 2,3 суток. Применение режимов перенацеливания КА ГДЗ на объекты с известными пространственными координатами расширяет перечень решаемых гиперспектральными методами мониторинговых задач и повышает эффективность использования технологий ГДЗ.

Разработаны основы синтеза управляющих воздействий и стабилизации движения ЛА ГДЗ по отклонению с визуальными обратными связями. Приведены примеры визуального управления по реперным ориентирам и компьютерные модели реализации управления. Разработанные методы визуального управления могут найти применение для стабилизации полета беспилотных ЛА в режиме зондирования местности щелевыми гиперспектрометрами, а также для организации адаптивного управления космическим мониторингом.

*Ключевые слова:* гиперспектральное дистанционное зондирование, методы классификации данных, фрактальные структуры, природные ресурсы, адаптивное управление аэрокосмическим мониторингом.

## ANNOTATION

**Artiushenko M.V. The methods of data fractal analysis and control of hyperspectral aerospace geomonitoring.** – Manuscript.

Thesis for a doctor of technical sciences degree in specialty 05.07.12 – remote aerospace researches. – State institution “Scientific center for aerospace researches of the Earth of IGS NAS of Ukraine”, Kyiv, 2015.

The doctoral thesis has aims to develop methods for automating processing of aerospace geo-monitoring hyperspectral data, to study models describing the structure spectral data and control methods of the monitoring to solve environmental and natural resource problems.

Methods and algorithms for hyperspectral data processing and express data processing on-board aircraft are developed, the organization of the adaptive control of aerospace monitoring. is considered.

The synthesis of continuous-group models, fractal and multifractal models was carried out to describe the structural features of the reflection spectrum. Examples of solving problems of oil and gas exploration on the reflection spectrum of the vegetation cover, automated classification of objects in hyperspectral images were given.

*Keywords:* hyperspectral remote sensing, methods of data classification, fractal structures, natural resources, adaptive management of aerospace monitoring.