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

ДУГІН СТАНІСЛАВ СЕРГІЙОВИЧ

УДК 528.88.04:504.064.2(477)

ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ТЕСТОВИХ ДІЛЯНОК ДЛЯ НАЗЕМНОЇ ВЕРИФІКАЦІЇ ДАНИХ КОСМІЧНОГО ГЕОМОНІТОРИНГУ ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ

05.07.12 – Дистанційні аерокосмічні дослідження

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата геологічних наук

Київ – 2017

Дисертацією є рукопис.
Робота виконана у Державній установі «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України».

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор, член-кореспондент НАН України
Федоровський Олександр Дмитрович,
завідувач відділу системного аналізу Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України».

Офіційні опоненти: доктор геологічних наук, старший науковий співробітник
Верховцев Валентин Геннадійович,
завідувач відділу спеціальної металогенії Державної установи «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України»;

кандидат геолого-мінералогічних наук, доцент, старший науковий співробітник
Дудар Тамара Вікторівна,
доцент кафедри екології Навчально-наукового інституту екологічної безпеки Національного авіаційного університету.

Захист дисертації відбудеться 04 липня 2017 р. об 11 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.162.03 Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України» за адресою: Україна, 01054, м. Київ, вул. Олеся Гончара, 55-Б.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Інституту геологічних наук НАН України (Україна, 01054, м. Київ, вул. Олеся Гончара, 55-Б).

Автореферат розіслано «29» травня 2017 р.

Секретар спеціалізованої
вченої ради Д 26.162.03
кандидат геологічних наук О.В. Седлерова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Незважаючи на існування багатьох різних методів та засобів дистанційного геомоніторингу території України, ще залишаються невирішеними деякі важливі питання, серед яких такі:

1. Обґрунтування вибору тестових ділянок для наземної верифікації багато- і гіперспектральних даних космічного геомоніторингу території України.

Практика показує, що достовірність і точність інформації космічних знімків істотно залежать від наявності та повноти польових даних. Польові дані отримують методом наземних фізичних (геохімічних, фітоіндикаційних і т.д.) вимірювань або за допомогою безпосереднього спостереження та обстеження об'єктів, що надає їм більш високу достовірність порівняно з дистанційними даними. Польові спостереження використовують як опорні (калібрувальні, завіркові) у процесах формування, обробки та інтерпретації космічних зображень. Сучасний стан накопиченого досвіду у світовому дистанційному зондуванні Землі (ДЗЗ) переконливо свідчить, що найбільш прийнятний шлях отримання та ефективного застосування даних ДЗЗ – це створення спеціально обладнаних полігонів. Цим шляхом вже досить тривалий час йде більшість країн, що мають власні супутники ДЗЗ (Україна, Німеччина, США, Франція, Японія, Індія, Китай, Росія та ін.).

2. Вивчення властивостей природних та антропогенних складових тестових ділянок України на основі спектрометричної інформації та створення відповідної бази спектральних характеристик довкілля.

ДЗЗ за допомогою супутникових гіперспектральних сенсорів є потужним інструментом для тривалого геомоніторингу рослинного покриву. Порівняно з традиційними багатоспектральними даними гіперспектральні дані пропонують нові спектральні характеристики, зокрема в зоні червоного краю такий індекс, як позиція червоного краю REP (абревіатура від англійської назви the Red Edge Position), та ін. За визначенням, REP – це довжина хвилі в інтервалі 680-760 нм, де швидкість зміни спектра відбиття досягає максимуму. Вегетаційні стреси різної природи, які призводять до зменшення хлорофілу, проявляються у спектрах відбиття рослин зсувами до коротких довжин хвиль, так званий “голубий зсув”. Збільшення вмісту хлорофілу в рослинах на різних фенологічних стадіях їх розвитку від початку росту до цвітіння супроводжується зсувами REP в напрямку збільшення, так званий “червоний зсув”.

Потужним інструментом для геомоніторингу земної поверхні, зокрема рослинного покриву, є сучасні бортові багато- та гіперспектральні сенсори. На даний час такі сенсори мають достатню спектральну і просторову розрізненність, щоб за допомогою зображень, які вони формують, класифікувати природні об’єкти та навіть визначати їх стан. Вирішення подібних складних задач здійснюється шляхом залучення процедури контрольованого навчання, що потребує знання властивостей природних та антропогенних складових тестових ділянок, насамперед оптико-спектральних характеристик об’єктів.

3. Вирішення тематичних задач природокористування на основі одержаних спектрометричних даних космічного геомоніторингу з урахуванням наземної верифікації вказаної інформації.

За допомогою контрольно-калібрувальних полігонів вирішують завдання контролю параметрів бортових технічних засобів ДЗЗ в процесі польоту та їх калібрування. Для цього на земній поверхні виділяють різноманітні об'єкти з відомими характеристиками. У разі калібрування багатоспектральних знімків необхідно забезпечити вимірювання величини абсолютної чутливості кожного спектрального каналу. Всі об'єкти на полігоні повинні характеризуватися максимально точною координатною прив'язкою. Тестові полігони використовуються для розробки і сертифікації методик, тематичних завдань ДЗЗ, створення і поповнення комп'ютерних баз даних про спектральні сигнатури об'єктів ДЗЗ та проведення інших досліджень.

При розв’язанні задачі створення тестових ділянок в основних фізико-географічних зонах для різних ландшафтно-геологічних умов України актуальним є використання системного підходу, сучасних методів моделювання, оцінки та прогнозу складних систем, можливостей сучасних інформаційних і комп’ютерних технологій. Велика кількість досліджень зі створення полігонів ДЗЗ, проведених такими провідними вченими, як R.M. McCoy, J.R. Anderson, A.F. Rahman, М.О. Попов, В.І. Лялько, О.Д. Федоровський, С.А. Станкевич, Н.М. Куссуль, О.І. Сахацький, В.Г. Якимчук, М.В. Артюшенко, С.С. Кохан, Я.І. Зєлик та ін., присвячена вирішенню задач геомоніторингу геологічного середовища України, в тому числі пошуку корисних копалин, кліматології, оцінці антропогенного навантаження та надзвичайних ситуацій тощо. Однак вивчення багатьох фахових публікацій показує, що методи створення тестових ділянок для вивчення геологічного середовища України в основних фізико-географічних зонах розроблені ще недостатньо. Це і зумовило вибір теми дисертаційного дослідження.

Дана дисертаційна робота, відображена в публікаціях [1–26], присвячена обґрунтуванню вибору тестових ділянок для наземної верифікації інформації космічного геомоніторингу території України, з метою підвищення його ефективності, що і зумовило її актуальність.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана згідно з планами наукових досліджень ДУ «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України» у рамках вісімнадцяти науково-дослідних тем, зокрема: «Оцінка впливу регіональних змін клімату на екосистеми та визначення ризиків їх негативних наслідків з використанням даних дистанційного зондування та наземних спектро-, газометричних і гідрометеорологічних вимірів» (Державний реєстраційний номер роботи 0116U002674); «Інформаційно-технологічне забезпечення оцінювання впливу парникового ефекту на зміни клімату та довкілля на регіональному рівні за матеріалами космічних зйомок та полігонних досліджень» (Державний реєстраційний номер роботи 0116U006574); «Розробка теоретико-методичних основ використання матеріалів космічних і полігонних спектро- та газометричних зйомок для забезпечення раціонального природокористування в умовах сталого розвитку суспільства» (Державний реєстраційний номер роботи 0116U003032); «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» (Державний

реєстраційний номер роботи 0113U000096); «Розробка нових методик космічного моніторингу земних покривів (рослинність, ґрунти, водні ресурси), біорізноманіття в умовах кліматичних змін з метою управління ризиками надзвичайних ситуацій» (Державний реєстраційний номер роботи 0112U000703); «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» (Державний реєстраційний номер роботи 0112U000702).

Мета і задачі дослідження. *Метою* дослідження є підвищення ефективності космічного геомоніторингу шляхом обґрунтування вибору і дослідження тестових ділянок для наземної верифікації даних ДЗЗ території України.

Досягнення поставленої мети вимагало розв'язання наступних *задач*:

– Обґрунтування вибору мережі контрольно-калібрувальних та тематичних полігонів (ділянок) ДЗЗ України для наземної верифікації матеріалів зйомок.

– Формування тестових ділянок для наземної верифікації даних ДЗЗ при розв'язанні задач природокористування.

– Типізація полігонних ділянок у різних фізико-географічних зонах України для вирішення завдань раціонального природокористування (геологічних, геоекологічних, сільськогосподарських тощо).

– Аналіз і вибір параметрів польової апаратури для оптимізації ДЗЗ на території України.

– Наземне дослідження спектрів відбиття земного покриву для тестових ділянок основних фізико-географічних зон України.

– Обґрунтування та апробація методів підвищення ефективності оцінки стану геологічного середовища в межах фізико-географічних зон України з використанням ДЗЗ.

Об'єкт дослідження – космічний геомоніторинг території України.

Предмет дослідження – тестові ділянки для наземної верифікації даних космічного геомоніторингу території України.

Методи дослідження. Для розв'язання поставлених задач використовувалися дистанційні, наземні інструментальні та геоінформаційні технології. Відповідно до сформульованої мети роботи застосовані наступні методи дослідження:

– Методи первинної цифрової обробки та класифікації багатоспектральних космічних даних.

– Метод спектрометричної індикації.

– Польові спектрометричні методи для калібрувально-завіркових досліджень.

– Картографічні методи аналізу окремих елементів ландшафту.

Інструментальна база: польовий прецензійний спектрорадіометр ASD FieldSpec3FR, система реєстрації змін CO_2 на основі газометричної апаратури Qubit Systems 150; система дистанційної реєстрації мінливості спектрометричних параметрів земної поверхні DJI STS-VIS; обладнання для визначення температурних показників TemPro-1200, TROTEC TP-10; тепловізор FLUKE Ti110.

Програмні продукти: обробки даних – ENVI; Satellite Tool Kit (STK 4.3); картографічні і ГІС-програми – Global Mapper, MapInfo, ArcGIS 9.1, MapSource 6.16.3.0; програма збереження спектрів FieldSpec3FR (RS 3); програма обробки спектрів ViewSpec Pro 6.0 тощо.

Вибір методів дослідження та інструментально-програмних продуктів обробки матеріалів забезпечив достовірність отриманих результатів і висновків.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Застосовано комплексний підхід до аналізу інформативних ознак при виборі тестових ділянок для спектрометричної верифікації даних гіперспектрального космічного геомоніторингу.

2. Вперше створено модель експертних оцінок для вибору тестових ділянок, здійснено порівняльний аналіз спектрометричних характеристик ландшафтно-геологічних особливостей України, тематичних задач природокористування та космічних систем спостереження, розроблено вимоги до тестових ділянок.

3. Вперше виконано експертне оцінювання основних полігонів України. Для подальшого дослідження вибрано шість тестових ділянок з урахуванням різних ландшафтно-геологічних умов.

4. Вперше для території України отримано характеристики гіперспектрального відбиття природного та антропогенного походження для вибраних тестових ділянок.

5. Вперше для основних полігонів України створено відповідну спектрометричну базу даних.

Набули подальшого розвитку:

– Методи з розв’язання задач природокористування на основі спектрометричної інформації космічного геомоніторингу з урахуванням матеріалів наземних спектрометричних зйомок на тестових ділянках.

– Методичні підходи до зіставлення гіперспектральних та газометричних наземних порівнянь оцінки потоків CO_2 у системі “атмосфера-рослинність”.

– Зіставлення гіперспектральних (багатоспектральних) космічних та наземних завіркових даних на тестових ділянках для верифікації та визначення інформативних індексів у зоні червоного краю та SWIR-області.

– Апробовані на тестових ділянках визначення варіацій індексів червоного краю спектрів відбиття під впливом просочування вуглеводнів з родовища на наземний хлорофільний індекс.

Удосконалені методичні підходи до більш надійного виявлення спектральних аномалій земної поверхні природного та антропогенного походження і відповідних вегетаційних індексів.

Практичне значення одержаних результатів. Досліджено вегетаційні індекси спектрів відбиття посівів озимої пшениці у польових умовах Степової та Лісостепової зон України. Зіставлено супутникові та наземні гіперспектральні дані при визначенні змін позиції червоного краю над рослинним покривом за даними польової спектрометричної зйомки, що дозволяє підвищити ефективність геологопошукових та геоекологічних робіт. Порівняно газометричні та наземні гіперспектральні дані оцінки потоків CO_2 в системі “атмосфера-рослинність” та отримано регресійне рівняння для агроценозів Лісостепової зони України, що дає

можливість більш надійно визначити продуктивність агросистем. Створено базу даних спектрів відбиття рослинного та антропогенного походження для основних фізико-географічних зон України.

Особистий внесок здобувача. Основою роботи слугували результати досліджень автора, виконаних ним особисто та у співавторстві. В опублікованих зі співавторами наукових працях, у яких відображені основні наукові результати дисертації, конкретний внесок здобувача полягав у наступному: підготовці до польових зйомок; проведенні польових та камеральних робіт; обстеженні територій досліджень для створення тестових ділянок; проведенні польового спектрометрування; розробленні методу комплексного застосування гіперспектральних індексів червоного краю для розрізнення рослинного покриву та оцінювання його стану за даними гіперспектральних сенсорів; проведенні попередньої обробки отриманих даних з використанням спеціалізованих програм (ViewSpec Pro v6.0, Garmin MapSource v6.16.2, ArcGis); проведенні топографічної прив'язки спектрометричних вимірювань на території досліджень за допомогою GPS-приймача; визначенні освітленості та температури; вимірюванні вологості; інтерпретації результатів ДЗЗ; прогнозуванні змін стану довкілля; підготовці наукових даних до публікації. Участь у постановці задачі зі створення полігонів ДЗЗ, проведення розрахунків та аналізу результатів польових досліджень, обговорення їх із співавторами, формулювання висновків.

Монографії:

1. Изменение земных систем в Восточной Европе: Лялько В.И. (ред.). Киев: Фолиант, 2010. 582 с. – проведено польові роботи з вибору полігонів, сформульовано положення для обґрунтування їх сертифікації та паспортизації в Україні.
2. Earth Systems Change over Eastern Europe: Coeditors P., Lyalko V. (Eds.). Kiev: Akademperiodyka, 2012. 488 p. ISBN 978-966-360-195-3. – проведено польові роботи з вибору полігонів, сформульовано положення для обґрунтування їх сертифікації та паспортизації в Україні.
3. Парниковий ефект і зміни клімату в Україні: оцінки та наслідки: Лялько В.І. (ред.). Київ: Наук. думка, 2015. 283 с. ISBN 978-966-00-1526-5. – запропоновано регресійні моделі експериментального визначення стоку (абсорбції рослинами) CO_2 для основних агрокультур України за матеріалами спектро- та газометричних вимірів.

Фахові видання, затверджені МОН України (геологічні науки):

1. У роботі **Дугін С.С**. Оцінка і вибір полігонів для наземної завірки інформації космічного геомоніторингу. *Доп. НАН України*. 2014. № 5. С. 87-95. – запропоновано новий підхід до оцінки і вибору полігонів для наземної верифікації даних космічного геомоніторингу.
2. У роботах Шпортюк З.М., Сибірцева О.М., **Дугін С.С.** Вплив просочування природного газу на наземний хлорофільний індекс та позицію червоного краю спектрів відбиття пшениці над газовим родовищем. *Доп. НАН України.* 2011. № 11. С. 115-119; Лялько В.І., Шпортюк З.М., Сибірцева О.М., **Дугін С.С.,** Кічка О.А. Гіперспектральні індекси для визначення змін рослинного покриву над нафтовим родовищем за даними спектрометричної зйомки. *Геол. журн.* 2012. № 4

(341). С. 79-85; Лялько В.І., Шпортюк З.М., Сибірцева О.М., **Дугін С.С.** Дослідження гіперспектральних індексів червоного краю для визначення змін рослинного покриву над нафтовим родовищем за даними спектрометричної зйомки. *Геол. журн*. 2014. № 3 (348). С. 95-104; Лялько В.І., Шпортюк З.М., Сибірцева О.М., **Дугін С.С.** Застосування гіперспектральних індексів для визначення змін трав'яного покриву за даними спектрометричної зйомки. *Доп. НАН України*. 2014. № 4. С. 105-111. – проведено польові роботи на вибраних тестових полігонах, запропоновано та перевірено гіперспектральні індекси, що можуть слугувати нафтогазопошуковими.

3. У роботі Жолобак Г.М., Шпортюк З.М., Сибірцева О.М., **Дугін С.С.** Дослідження спектрів відбиття посівів озимої пшениці молочно-воскової стиглості в зоні червоного краю як потенційних індикаторів дистанційної диференціації гетерогенності рослинного покриву. *Доп. НАН України.* 2012. № 10. С. 103-108. – запропоновано та перевірено на тестовому прикладі використання гіперспектральних індексів.

4. У роботі Костюченко Ю.В., Соловйов Д.М., Ющенко М.В., **Дугін С.С.,** Копачевський І.М., Артеменко І.Г. Використання наземних гіперспектрометричних вимірювань для калібрування даних ДЗЗ в задачах оцінки стану навколишнього середовища. *Доп. НАН України.* 2012. № 10. С. 109-114. – перевірено на тестовому прикладі використання наземних гіперспектрометричних вимірювань для калібрування даних ДЗЗ.

5. У роботі Попов М.А., Станкевич С.А., Зелык Я.И., Шкляр С.В., Семенив О.В., **Дугин С.С.**, Жуков Б.С. Оценивание спектральной чувствительности многоспектральной съёмочной аппаратуры спутниковой системы "Сич-2" по наземным спектрометрическим измерениям. *Соврем. пробл. ДЗЗ из космоса*. 2014. Т. 11, № 2. С. 152-164. – проведено польові роботи на вибраному тестовому полігоні, перевірено та оцінено на прикладі полігону ДЗЗ спектральну чутливість супутникової системи "Січ-2" за наземними спектрометричними вимірами.

6. У роботах Лялько В. І., Халаїм О. О., Сахацький О. І., Жолобак Г. М., Ваколюк М. В., **Дугін С.С.** Експериментальне визначення стоку (абсорбції рослинами) CO_2 для основних агрокультур України. *Укр. журн. ДЗЗ*. 2015. № 4. С. 46-74. http://ujrs.org.ua/ujrs/index; Лялько В.І., Сахацький О.І., Жолобак Г.М., Сибірцева О.М., **Дугін С.С.,** Ваколюк М.В., Халаїм О.О. Аналіз корелятивних зв'язків вегетаційних індексів червоного краю з валовою первинною продуктивністю за даними газо- та спектрометричних вимірів для виробничих посівів озимої пшениці в Баришівському районі Київської області. *Укр. журн. ДЗЗ*. 2016. № 8. С. 8-12. http://ujrs.org.ua/ujrs/index. – запропоновано регресійні моделі експериментального визначення стоку (абсорбції рослинами) CO_2 для основних агрокультур України та запропоновано новий підхід при зіставленні вегетаційних індексів, обчислених одночасно як за супутниковими даними космознімків Sentinel-2A, так і за результатами наземного спектрометрування.

7. Лялько В.І., Шпортюк З.М., Сибірцева О.М., **Дугін С.С.** Гіперспектральні індекси для розрізнення нафтонасичених ґрунтів за даними дистанційного спектрометрування *Геол. журн*. 2015. № 4 (353). С. 105-112. – проведено польові

роботи на вибраних тестових ділянках, досліджено зміни гіперспектральні індекси HD та HI, що можуть слугувати нафтогазопошуковими.

Апробація результатів дисертації. Основні теоретичні та методичні положення, висновки і попередні результати дисертаційного дослідження були представлені, обговорені та отримали схвалення на науково-технічних конференціях: Попов М.О., Ковальчук С.П., Пікулік В.І., Козлова А.О., **Дугін С.С.,** Яценко В.О., Катковський Л.В. Принципи організації оптико-спектральних вимірювань польових об'єктів та створення спектральної бази даних. *Приладобудування: Стан і перспективи*: Тези доп. XI Міжнар. наук.-техн. конф. (Київ, 24-25 квіт. 2012). Київ: Нац. техн. ун-т України «КПІ», 2012. С. 59-60; Попов М.А., Станкевич С.А., Подорван В.Н., **Дугин С.С.** Оценка гомогенности спектральных характеристик тестовых участков для калибровки спутниковой многоспектральной съемочной аппаратуры. *XIII Укр. конф. з косм. досліджень:* Тези доп. (Євпаторія, 2-6 верес. 2013). Євпаторія, 2013. С. 195; Лялько В.І., Сахацький О.І., Жолобак Г.М., Апостолов О.А., **Дугін С.С.,** Сидорова Н.П. Дослідження структури посівних площ сільськогосподарських культур окремих адміністративних областей України за даними космічної зйомки. *XIV Укр. конф. з косм. досліджень*: Тези доп. (Київ, 8-12 верес. 2014). Київ: ІКД НАНУ-НКАУ, 2014. С. 153; Лялько В.І., Сахацький О.І., Жолобак Г.М., Апостолов О.А., **Дугін С.С.**, Сидорова Н.П. Аналіз структури посівних площ на рівні адміністративних областей України за супутниковими даними. *Інновац. менеджмент збалансов. (сталого) природ. агровиробництва*: Матеріали міжнар. наук.-практ. конф., присвяченої 90-річчю від дня народження Ф.Т. Моргуна. Дніпропетровськ: Вид-во «Свідлер А.Л.», 2014. С. 294; Лялько В.І., Сахацький О.І., Жолобак Г.М., Апостолов О.А., **Дугін С.С.,** Сидорова Н.П. Дослідження класів земного покриття з оцінкою структури посівних площ адміністративних областей України за даними космічної зйомки MODIS. *Інтеграція геопростор. даних у дослідженнях природ. ресурсів:* Матеріали міжнар. наук.-прак. конф. (Київ, 27- 28 листоп. 2014). Київ, 2014. С. 23-26; Шпортюк З.М., Сибірцева О.М., **Дугін С.С.** Дослідження гіперспектральних індексів червоного краю для визначення змін рослинного покриву над нафтовим родовищем за даними спектрометричної зйомки. *XIV Укр. конф. з косм. досліджень*: Тези доп. (Ужгород, 8-12 верес. 2014). Київ, 2014. С. 173; Лялько В.І., Сахацький О.І., Сибірцева О.М., Жолобак Г.М., **Дугін С.С**., Ваколюк М.В., Заглада Є.В. Порівняння вегетаційних індексів посівів озимої пшениці, розрахованих на основі дистанційних даних супутника Sentinel-2 та FieldSpec. *Аерокосм. спостереження в інтересах сталого розвитку і безпеки: GEO-UA 2016*: Матеріали доп. (Київ, 8-9 верес. 2016). Київ: НАН України, ІКД НАН України та ДКА України, НТУ України «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2016. С. 14-15.

Додаткові публікації за темою дисертаційної роботи. У роботі Лялько В.І., Шпортюк З.М., Сахацький О.І., Сибірцева О.М., **Дугін С.С.,** Григоренко В.В. Зіставлення супутникових та наземних гіперспектральних даних при визначенні позиції червоного краю спектрів відбиття. *Косм. наука і технологія*. 2010. Т. 16, № 3. С. 39-45. – запропоновано та перевірено на тестовому прикладі використання атмосферно коригованих даних сенсора EO-1 «Hyperion», що дає точніші значення REP для трав’яного покриву, ніж у випадку некоригованих даних гіперспектральних даних. У роботі Артюшенко М.В., **Дугин С.С.,** Федоровский А.Д. Моделирование и синтез орбитальной группировки космических аппаратов

зонального наблюдения территории Украины. *Косм. наука і технологія*. 2011. Т. 17, № 5. С. 50-57. – адаптовано до умов України на вибраних тестових полігонах та промодельовано створення мікросупутникового угруповання. У роботі Жолобак Г.М., Шпортюк З.М., Сибірцева О.М., **Дугін С.С**. Дослідження вегетаційних індексів червоного краю спектрів відбиття посівів озимої пшениці, вирощеної у польових умовах Степової зони України. *Косм. наука і технологія*. 2012. Т. 18, № 4. С. 45-51. – запропоновано та перевірено на тестовому прикладі придатність вегетаційних індексів слугувати індикатором гетерогенності озимої пшениці. У роботі Костюченко Ю.В., Соловйов Д.М., Ющенко М.В., **Дугін С.С.,** Копачевський І.М., Білоус Ю.Г., Артеменко І.Г. Щодо можливостей застосування даних наземних полігонних спектрометричних вимірювань для калібрування даних ДЗЗ в задачах оцінки гідролого-гідрогеологічної безпеки. *Косм. наука і технологія*. 2012. Т. 18, № 6. С. 14-21. – запропоновано та проведено апробацію даних наземних полігонних спектрометричних вимірювань для калібрування даних ДЗЗ. У роботі Лялько В.І., Шпортюк З.М., Сибірцева О.М., **Дугін С.С.,** Воробйов А.І. Дослідження варіацій індексів червоного краю спектрів відбиття пшениці над газовим родовищем. *Косм. наука і технологія*. 2012, Т. 16, № 6. С. 5-10. – запропоновано та перевірено на тестовому прикладі придатність вегетаційних індексів слугувати індикатором змін стану рослинного покриву озимої пшениці, що можуть виступати як нафтогазопошукові. **Патент:** Спосіб фрактальної спектрометричної фітоіндикації виявлення аномалій природного та техногенного походження: пат. № 104360 Україна. МПК G01V 9/00, G01V 11/00. Федоровський О.Д., Артюшенко М.В., **Дугін С.С**.; заявл. а 2012 09155 від 25.07.2012; опубл. 27.01.2014, Бюл. № 2.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 27 робіт, у тому числі: 3 монографії; у виданнях, що внесені до переліку наукових фахових видань України з геологічних наук – 11 (з яких: 1 – виконано одноосібно, 4 – включено у наукометричну базу РІНЦ, 1 – включено у наукометричну базу Scopus); 1 патент; 5 публікацій – в інших журналах та виданнях України; 7 – у збірниках матеріалів і тез доповідей вітчизняних і закордонних конференцій та форумів.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (258 найменувань на 29 сторінках). Робота викладена на 214 сторінках, що містять 9 сторінок анотації, 150 сторінок основного тексту (в тому числі 28 рисунків, 43 таблиці), а також 7 додатків на 26 сторінках.

Подяки. Дисертаційну роботу виконано у Державній установі «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України» під науковим керівництвом д-ра фіз.-мат. наук, проф., чл.-кор. НАН України О.Д. Федоровського, якому автор висловлює щиру подяку. Дисертант вдячний колегам по спільним дослідженням за корисні поради, консультації, співпрацю, обмін інформацією та підтримку – д-ру техн. наук, проф. М.О. Попову, акад. НАН України В.І. Ляльку, д-ру геол. наук О.І. Сахацькому, д-ру техн. наук С.А. Станкевичу, д-ру техн. наук М.В. Артюшенко, канд. біол. наук Г.М. Жолобак, канд. мат. наук З.М. Шпортюк, канд. геол. наук Л.П. Ліщенко, канд. техн. наук А.О. Козловій та О.М. Сибірцевій.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність роботи з вибору тестових ділянок, вказано її зв'язок з науковими програмами, визначено цілі та задачі досліджень для верифікації інформації космічного геомоніторингу, показано новизну та практичну значущість отриманих результатів досліджень, подано інформацію про особистий внесок автора, апробацію роботи, вказано конференції, на яких доповідались основні результати досліджень, що увійшли в дисертацію.

Перший розділ – **"***Основні передумови вибору тестових ділянок для наземної верифікації даних космічного геомоніторингу території України"* – розглядає тестові полігони ДЗЗ, які використовуються для розробки і сертифікації методик вирішення тематичних задач ДЗЗ, створення і поповнення комп'ютерних баз даних про спектральні сигнатури об'єктів ДЗЗ і проведення інших наукових досліджень. З цією метою на території полігону облаштовуються, або просто вибираються тестові ділянки, кожна з яких має певні стійкі характеристики (спектральна яскравість, геометричні показники та ін.). Ці характеристики використовуються при інтерпретації зображень в якості атрибутивних ознак відповідного класу об'єктів. Також сформульовано загальну постановку завдання даної дисертаційної роботи.

У другому розділі – *" Обґрунтування вимог для проведення досліджень на тестових ділянках верифікації даних космічного геомоніторингу території України "* – розглянуто особливості геологічної будови та мінералогія території України, що дають можливість більш надійно прогнозувати нафтогазові родовища, а також поклади кольорових металів, ряду рідкісних металів, кольорових каменів та ін. Спектральні характеристики рослин можуть бути джерелом певної інформації про характер та інтенсивність перебігу цих процесів. Розглядаючи рослину як «інструмент», необхідно підкреслити особливості її реакції на дію факторів довкілля. Рослинні угруповання можуть містити елементи, кожний з яких проявляє низьку чутливість до окремих чинників. Однак завдяки кумулятивному ефекту протягом тривалого часу відбуваються зміни в стані систем вищого порядку, що саме й дозволяє використовувати дистанційні методи для просторово-часових природних та антропогенних аномалій.

У третьому розділі – **"***Порівняльний аналіз характеристик тематичних задач природокористування і тестових ділянок ДЗЗ у різних ландшафтно-геологічних умовах України*" – розглянуто полігон ДЗЗ як складну екобіосистему, що вимагає великого обсягу польових вимірювань і спостережень. При методичному забезпеченні цих робіт ключовими є питання вибору параметрів, що підлягають вимірюванню, обґрунтуванню необхідної точності і періодичності вимірювань і спостережень. Стосовно об'єктів зондування – це спектральні характеристики відображення, поглинання і пропускання, а також ступінь їх поляризації. Крім того, потрібен періодичний контроль земної поверхні за допомогою вимірювань вологості і геохімічного складу ґрунту. Принцип єдності вимірювань вимагає, щоб їх результати були прив'язані до національних або міжнародних стандартів, а похибки вимірювань були чітко встановлені і витримувалися (рис. 1). У підрозділі 3.1. *Особливості вибору і оцінки мережі тестових ділянок (полігонів) ДЗЗ для верифікації даних космічного*

геомоніторингу в Україні проведено оцінку і вибір мережі полігонів, враховуючи ландшафтно-кліматичні зони України, специфіку тематичних завдань ДЗЗ та наявність діючої мережі наземних полігонів. Таким чином, щоб забезпечити необхідну наземну завірку космічної інформації ДЗЗ, полігони повинні задовольняти певним вимогам. Наводяться такі категорії вимог, як структура, випромінювально-відбивні характеристики, географічне розташування і розміри, методичне і технічне забезпечення, сертифікація. Структура полігону розробляється на етапі його створення відповідно до можливостей місцевої екосистеми та переліку тематичних задач ДЗЗ. Випромінювально-відбивні характеристики підстилаючої поверхні тестових ділянок повинні мати коефіцієнт відбиття в заданому спектральному діапазоні не менше 0,3; поверхня має бути близькою до ламбертовської; форма спектральної характеристики повинна бути в межах робочого спектрального інтервалу досить плоскою і стабільною.

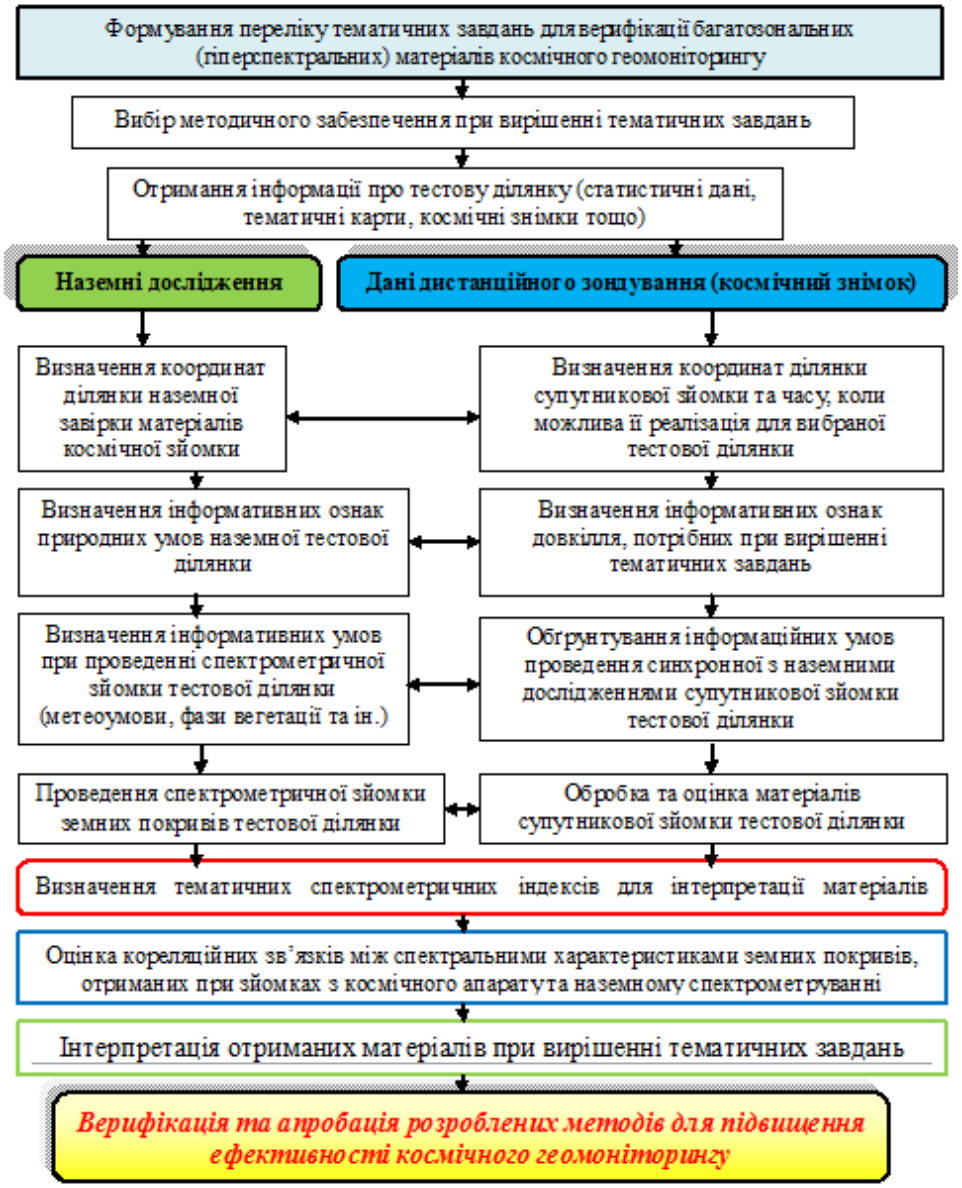

Рис. 1. Концептуальний алгоритм проведення досліджень по наземній завірці (валідації) матеріалів космічних багатоспектральних (гіперспектральних) зйомок

При виборі місця розташування наземного полігону ДЗЗ слід брати до уваги насамперед ландшафтно-кліматичні та геолого-геоморфологічні особливості території, оскільки місцевий клімат, характерна рослинність і рельєф визначають структуру полігону і склад тестових об'єктів. Методичне і технічне забезпечення для нормального функціонування тестових ділянок полігонів має включати великий обсяг польових вимірювань і спостережень. Це вибір параметрів, що підлягають вимірюванню, обґрунтуванню необхідної точності і періодичності вимірювань, а саме: інтегральних і спектральних характеристик відбиття, поглинання і пропускання, а також вологості і геохімічного складу ґрунту земної підстилаючої поверхні. Проведено оцінку та аналіз тематичних завдань ДЗЗ і характеристик полігонів. Геолого-географічні та тематичні характеристики мережі вибраних тестових ділянок (полігонів) ДЗЗ (Шацький-Полісся, Київський-Лісостеп, Вінницький-Лісостеп, Миколаївський-Степ, Кримський-Степ, Карпатський-Гірський) наведені в табл. 1. У підрозділі 3.2. *Приклад верифікації гіперспектральних супутникових та наземних даних на Київському полігоні (тестовій ділянці) ДЗЗ* встановлено основні дешифрувальні ознаки та критерії належності покривних елементів ландшафту до відповідного класу, характерних для Київського полігону ДЗЗ. Робота на Київському міському полігоні мала на меті таке: провести зіставлення гіперспектральних даних супутникового сенсора EO-1 «Hyperion» і даних наземного вимірювання спектрорадіометра FieldSpec3FR при оцінюванні REP-спектрів відбиття деяких типів земного покриття на тестовій ділянці Маріїнського парку м. Київ і перевірити правильність класифікації REP-зображень (рис. 2). Ідентифікація різновидів рослинних спільнот за величиною REP та зміни REP внаслідок геохімічних стресів, уражень рослин шкідниками, забруднення довкілля свідчать про можливість використання REP-зображень, побудованих за даними гіперспектрального космознімання для просторового аналізу стану рослинного покриву Землі на значних територіях. У підрозділі 3.3. *Вибір параметрів орбітальної системи космічних апаратів, яка мінімізує розриви спостереження на тестових ділянках (полігонах) ДЗЗ* розглянуто динамічну задачу синтезу орбітальних супутникових систем зонального огляду Землі. Синтез проводився за умови мінімізації статистичного критерію часу повторного огляду, з урахуванням обмежень на змінні стану системи і вимог ефективної експлуатації. Наведено приклад моделювання та синтезу орбітальної системи спостереження території України для вирішення тематичних завдань. В результаті синтезу параметри орбіт космічного угруповання космічних апаратів можуть бути використані для попередньої оцінки обґрунтування можливості створення мікросупутникових угруповань ДЗЗ території України, обґрунтованих вимог до апаратури корисного навантаження. Показана принципова можливість створення мікросупутникового угруповання геомоніторингу території України, проведено моделювання характеристик спостереження об'єктів, наведено алгоритми аналізу статистичних характеристик зонального спостереження угрупованнями космічних апаратів ДЗЗ при зміні геометрії їх орбіт у процесі експлуатації (перехід на близькокульові та еліптичні орбіти). Максимальний час повторного огляду всіх об'єктів, розташованих на території України, становить приблизно 2,7 доби.

Таблиця 1

Ієрархічна модель оцінки і вибору космічних завірочних полігонів для

Рівень 0. Оцінка наземних полігонів для завірки інформації космічного геомоніторингу			
Рівень 1. Основні напрями використання космічної інформації ДЗЗ			
Екологія і НС	Геологія	Сільське господарство	Геодезія та картографія

Рівень 2. Тематичні задачі космічного геомоніторингу ДЗЗ										
2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	2.10	2.11
Оцінка пожежної безпеки території	Моніторинг міських агломерацій	Моніторинг екостану водойм	Моніторинг рослинного покриву	Визначення видового складу лісів	Пошук покладів корисних копалин	Дослідження геологічних структур ландшафтно-кліматичних зон	Окреслення видових угруповань	Оцінка агрокультур і врожайності	Картографування продуктивності екосистем	Картографування розповсюдження спричинених стресів

Рівень 3. Основні вимоги до полігонів			
Географічне положення	Відповідність даних наземної і космічної зйомки	Орбітальне покриття поверхні спостереження і періодичність КА	Випромінювально-відбивні характеристики

Рівень 4. Основні наземні полігони України																	
4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	4.7	4.8	4.9	4.10	4.11	4.12	4.13	4.14	4.15	4.16	4.17	4.18
Шацький	Київський (Міський)	Київський (Агро)	Вінницький	Миколаївський	Роменський	Карпатський	Кримський (Тарханкут)	Кримський (Кацівелі)	Кримський (Керч)	Яворівський	Степового заповідник	Харківський лісний полігон	Заповідник «Асканія	Заповідник « Еланецький»	Дунайський заповідник	Полігон «Чауда»	Кримський (НЦУКВКЗ)
Значення узагальненого критерію $Fx10^3$ для порівнюваних полігонів																	
14	*5,7*	*7,1*	*12*	*9,0*	*4,3*	*6,0*	*9,5*	*3,5*	*2,3*	*2,8*	*6,9*	*3,4*	*4,3*	*2,5*	*5,6*	*3,8*	*2,3*

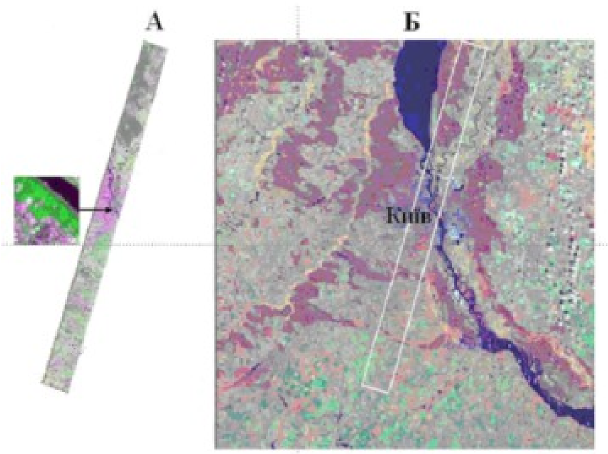

Рис. 2. Синтезоване зображення знімка EO-1 «Hyperion» (14.09.2002) в межах Київського регіону (синтез каналів 20, 30 та 40) (А) та синтезоване зображення знімка «Landsat» ETM (14.09.2001) (синтез каналів 2, 4, 5) (Б). Білий прямокутник на знімку «Landsat» ETM вказує на розташування знімка «Hyperion». Фрагмент знімка EO-1 «Hyperion» показує ділянку детальних досліджень в межах загальної сцени

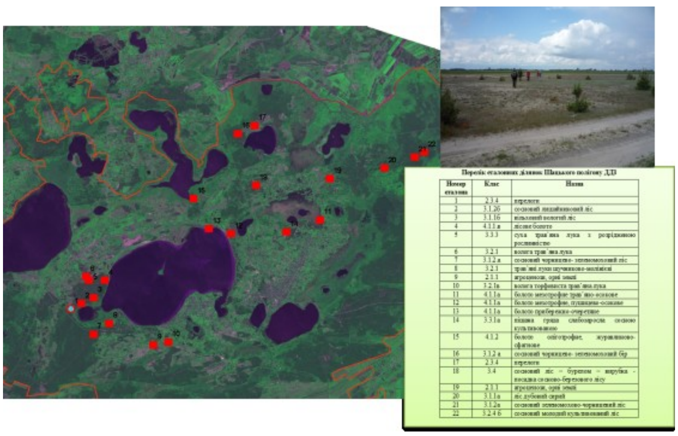

Рис. 3. Адаптована до умов України європейська система класифікації земних покривів CORINE Land Cover (Шацький полігон ДЗЗ)

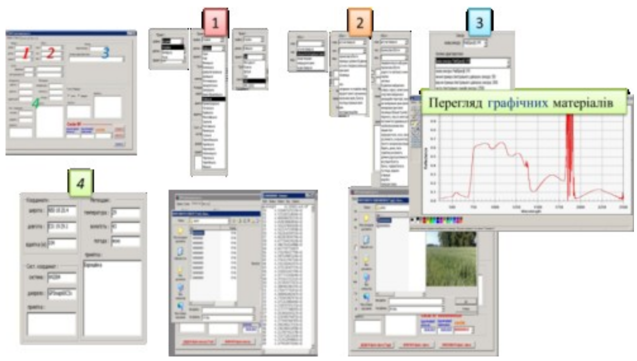

Рис. 4. Створення бази даних спектрів відбиття земної поверхні: 1. країна, проект, регіон; 2. клас, тип, вид; 3. характеристики сенсора; 4. координати точки вимірювання, метеодані (за умови, що дослідження проводилось не в камеральних умовах), дати проведення зйомки

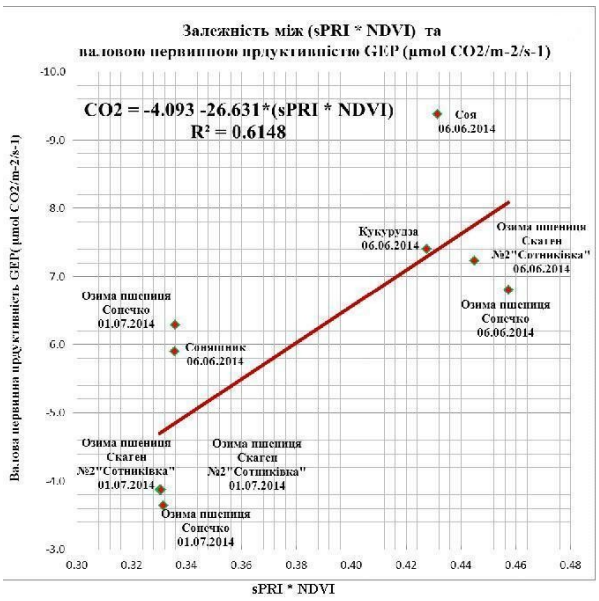

Рис. 5. Лінійна залежність обчислення абсорбції CO_2 агрокультурами Лісостепової зони України від спектрального індексу (sPRI×NDVI)

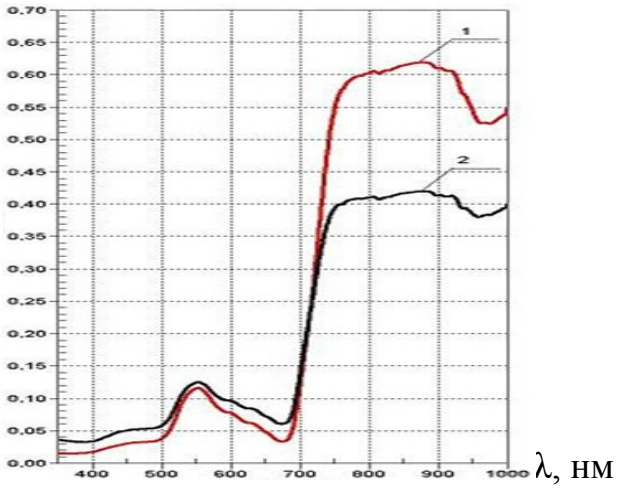

Рис. 6. Графіки зміни спектрометричних коефіцієнтів відбиття пшениці за межами родовища $R_1(\lambda)$ та над Глібовським газовим родовищем $R_2(\lambda)$ за даними спектрорадіометра FieldSpec3FR від 27.05.2010 р.

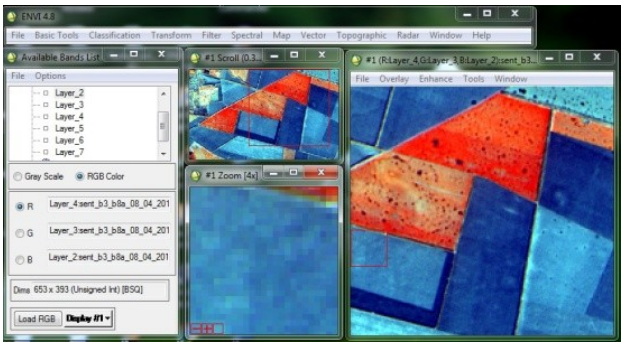

Рис. 7. Синтезоване зображення знімка Sentinel-2 тестових ділянок сільськогосподарських угідь полігону «Березань» від 08.04.2016р.

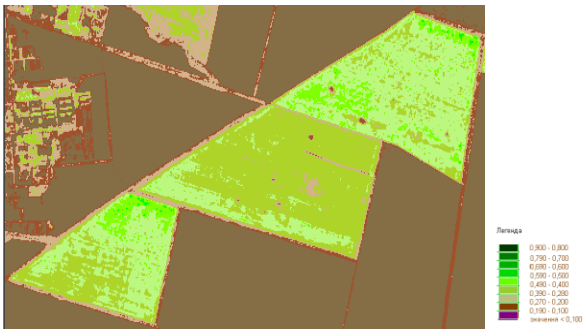

Рис. 8. Індекс NDVI, розрахований з знімка Sentinel-2 тестових ділянок сільськогосподарських угідь полігону «Березань» від 08.04.2016р. Спектральний канал 660, 840 нм, номери каналів (8-4)/(8+4)

Розділ 4 – *“Апробація та верифікація тематичних задач природокористування на вибраних полігонах ДЗЗ”*. У підрозділі 4.1. *Наземні дослідження за допомогою польового спектрорадіометра FieldSpec3FR та створення бази даних спектрів відбиття земної поверхні на основі адаптованої європейської системи класифікації земних покривів CORINE Land Cover (CLC) (Шацький полігон ДЗЗ) – Полісся* розроблено та адаптовано до умов України виконання польових робіт з використанням спектрорадіометра FieldSpec3FR, європейської системи класифікації земних покривів CORINE Land Cover (рис. 3) та створено базу даних польових вимірювань (рис. 4). *У підрозділі 4.2. Виявлення особливостей вегетаційних індексів спектрів відбиття різних сортів посівів озимої пшениці в умовах Степової зони України (Миколаївський полігон ДЗЗ) –*

Степ висвітлено результати спектрометрування приладом FieldSpec3FR дрібноділянкових посівів демонстраційного полігону елітного насіннєвого господарства «Золотий колос» у Миколаївській області, на основі яких розраховано вегетаційні індекси червоного краю (REP, TCI, NDVI705) для двох різновидів (лютесценс та еритроспермум) озимої пшениці м'якої (*Triticum aestivum* L.) та різновиду озимої пшениці твердої (*Triticum durum* Desf.). У підрозділі 4.3. *Визначення кореляційних зв'язків між газометричними та наземними гіперспектральними даними рослинності для оцінки потоків* CO_2 *в системі "атмосфера-рослинність" (Київський полігон ДЗЗ) – Лісостеп* використано метод оцінки фотосинтетичного компоненту потоків CO_2 при комбінації даних зйомки спектрорадіометра FieldSpec3FR та даних по потоках при наземних газометричних вимірюваннях. Було залучено підхід, пов'язаний з напівемпіричним статистичним моделюванням при отриманні кореляційної залежності гіперспектральних поверхневих характеристик потоків CO_2, одержаних дистанційно та шляхом газометричних вимірювань для різних сільськогосподарських культур. На основі кореляційної залежності отримано дані потоків CO_2, які відображають інтенсивність фотосинтезу для озимої пшениці, сої, кукурудзи, соняшника. Існує кілька модельних підходів, що застосовуються для одержання оцінок потоків CO_2 в екосистемі та її біологічної продуктивності: 1 – це статистичні моделі, які кореляційно пов'язують потоки з різними кліматичними змінними; 2 – це параметричні моделі, в яких використана концепція коефіцієнта ефективності використання світла (LUE – light-use efficienc), що дозволяє розкласти потоки на різні компоненти; 3 – це моделі процесів, в яких враховані основні процеси фотосинтезу і дихання рослин. Статистичні та параметричні моделі є напівемпіричними за своєю природою і, як правило, свої для кожного біома. Моделі процесів виявилися найбільш складними; крім того, деякі з них вимагають безлічі параметрів з глобальних екосистем, що, як правило, недоступні. Дистанційне зондування дозволяє забезпечити даними такий метод, за допомогою якого досліджують і отримують просторові схеми поведінки потоків CO_2. Численні дослідження показали, що оптично отриманий NDVI можна використовувати для визначення оцінок потоків CO_2 від рослинності. NDVI пов'язаний з часткою фотосинтетично активного випромінювання (PAR – Photosynthetically Active Radiation), що поглинається зеленою рослинністю (або f_{APAR}). Використано моделі радіаційного переносу в покриві, щоб показати, що і NDVI, і f_{APAR}, обидва, чутливі до величини поверхні листя в зеленому рослинному покриві. Біофізичні властивості покривів рослин показали, що NDVI і f_{APAR} функціонально пов'язані. Існує також обґрунтований емпіричний доказ, що між цими двома оптичними властивостями покривів рослин є взаємозв'язок. Моделювання та емпіричні дослідження дозволили встановити, що зв'язок між NDVI і f_{APAR} також нечутливий до змін зенітного кута сонячного освітлення. Було показано, що f_{APAR} можна помножити на коефіцієнт ефективності та отримати чисту первинну продуктивність (NPP – Net Primary Productivity) або чисте фотосинтетичне прирощення вуглецю для ділянки рослинності (A.F. Rahman et al., 2001):

$$NPP = (\varepsilon \times \Sigma f_{APAR}), \quad (1)$$

де NPP – оцінюють як наземну біомасу (в кг), накопичену за сезон зростання; Σ fAPAR – річний інтеграл фотосинтетично активного випромінювання (PAR) (в μmol CO_2/m-2/s-1), поглинений рослинністю; ε – визначають як ефективність, з якою поглинене PAR-випромінювання перетворюється на біомасу. Відомо, що NDVI можна виразити у вигляді функції, а залежність між цими двома членами не залежить від зенітного кута сонця. Тоді рівняння (1) можна переписати в термінах функції:

$$NPP = f(\varepsilon \times NDVI). \quad (2)$$

Зазвичай, ε не отримують безпосередньо з даних ДЗЗ. ε – відносно постійне значення серед рослин одного і того ж метаболічного типу, але може змінюватися в залежності від фенологічної стадії, кліматичних умов і водного стресу. Однак деякі дослідження показали, що оптично обґрунтований індекс, що отримується з гіперспектрального (вузькосмугового) коефіцієнта віддзеркалення і названий фотосинтетичним індексом відбиття (PRI), розглядався як багатообіцяюча міра ефективності використання світла рослинністю (LUE). Цей зв'язок виникає, оскільки вказаний індекс фіксує відгук пігментів ксантофілового циклу на мінливі світлові умови. За умови надлишку світла, коли PAR перевищує ємність фотосинтетичних реакцій, певні каротиноїди листя, відомі як пігменти ксантофілового циклу, слугують центрами розсіювання надлишку світла за допомогою вироблення тепла, у такий спосіб захищаючи фотосинтетичний апарат. Це здійснюється через активацію ензиму діпоксидази, який присутній в хлоропластах листя. Діпоксидаза переходить у віолаксантин, а ксантофіл, який передає енергію світла на фотосинтетичний апарат, переходить в зеаксантин, ксантофіл також направляє світлову енергію з фотосинтетичного апарату і розсіюється у вигляді тепла. Ця реакція перетворюється на свою протилежність при поганих світлових умовах, тобто зеаксантин переходить назад у віолаксантин через активацію ензиму епоксидази в хлоропластах листя. Оптичну реакцію пігментів ксантофілового циклу можна виявити за допомогою зміни коефіцієнта відбиття на довжині хвилі 531 нм. Так як ці пігменти відповідають за регуляцію енергії поглиненого світла в межах листка рослини, характеристики їх коефіцієнтів відбиття дають корисний оптичний індикатор мінливості фотосинтетичної активності. На цій підставі введено індекс PRI для коефіцієнта відбиття рослинності у вузькому каналі на довжині хвилі 531 нм. Початкова довжина хвилі коефіцієнта відбиття – 550 нм. Довжина хвилі в 570 нм була прийнята в якості опорного (фонового) значення. Досліджувався також зв'язок між коефіцієнтом відбиття на 531 нм і ефективністю використання світла при фотосинтезі LUE для листа. Було висунуто гіпотезу про те, що індекси PRI і LUE можна широко застосовувати для різних видів рослинності, різних їх функціональних типів і рівнів живлення. На основі цих результатів була висунута гіпотеза про те, що параметр LUE для рослинності можна виразити в термінах PRI. Потім рівняння (2) можна переписати, впроваджуючи PRI у вигляді коефіцієнта ефективності для короткочасної оцінки швидкості фотосинтезу в екосистемі (або для поглинання CO_2):

$$CO_2 = f\,(PRI \times NDVI). \quad (3)$$

За допомогою фотосинтетичного потоку CO_2 від тестових ділянок у різні дні і з отриманими значеннями NDVI і sPRI можна протестувати "альтернативний підхід", який аналізувався. На підставі рівняння (3) була використана лінійна регресійна модель, щоб пов'язати значення сумарного фотосинтетичного потоку CO_2 з гіперспектральними індексами:

$$CO_2 = a + b \times (sPRI \times NDVI). \quad (4)$$

Влітку 2014 р. було проведено експериментальні дослідження на типовому для Лісостепової зони України полігоні "Березань" (табл. 2), де розташовані угіддя ТОВ "Баришівська зернова компанія" з типовими агрокультурами.

Таблиця 2

Характеристика природних умов та газоспектрометричних особливостей агрокультур полігону «Березань» на час проведення досліджень

Дата	6 червня 2014					1 липня 2014			
Агрокультура	1	2	3	4	5	6	7	8	9
NEE	-3.8	-5,1	-6,3	-2,9	-3,1	-3,2	-0,7	-0,6	-0,7
ER	3,4	1,7	3,1	4,5	2,8	3,1	2,9	3,3	3,2
GEP Валова первинна продуктивність ($\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)	-7,2	-6,8	-9,4	-7,4	-5,9	-6,3	-3,6	-3,9	-3,9
NDVI 800-660)/(800+660)	0,9	0,9	0,9	0,8	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
PRI (531-570)/(531+570)	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,1	0,0	-0,1	-0,1	-0,1
sPRI (PRI+1)/2	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
NDVI* sPRI	0,44	0,46	0,43	0,43	0,34	0,34	0,33	0,33	0,33
Освітленість, Lux	731,0	696,0	757,0	730,0	633,0	800,0	793,0	857,0	865,0
t ґрунту на глибині 7 см, °C	20,0	21,8	27,3	33,8	25,5	20,7	21,2	20,2	20,1
t повітря, °C	37,5	37,1	34,5	38,0	33,8	33,6	34,8	34,5	35,3
Відносна вологість, %	41,3	42,0	48,8	40,2	45,0	43,6	43,7	45,0	42,4

*Примітка:*1 – озима пшениця Скаген № 2 «Сотниківка»; 2 – озима пшениця «Сонечко»; 3 – соя; 4 – кукурудза; 5 – соняшник; 6 – озима пшениця «Сонечко»; 7 – озима пшениця «Сонечко»; 8 – озима пшениця Скаген № 2 «Сотниківка»; 9 – озима пшениця Скаген № 2 «Сотниківка».

Коефіцієнти a і b було отримано шляхом розрахунку лінійної регресії між сумарним дихальним потоком CO_2 і добутком (sPRI×NDVI). Зіставлення газометричних та спектрометричних вимірювань виконано в полуденний час 06.06 та 01.07.2014 р.: 9 вимірів по 4 основних агрокультурах (озимій пшениці Скаген № 2 "Сотниківка" та "Сонечко", сої "ПВС 0,8", кукурудзи "P9578", "PR37N01" "PR37Y12", соняшнику "Перформер"). Для регресійного аналізу використано відкоригований R^2 (коефіцієнт детермінації), оскільки він враховує кількість незалежних змінних, що входять в рівняння регресії. При використанні регресійного аналізу високе значення R^2 і відносно низьке значення p може свідчити про зростання ступеня достовірності, а це означає, що залежність є статистично значущою. Індекс NDVI виявив залежність від сумарного потоку CO_2 із значенням R^2 = 0,6057, а індекс PRI показав відповідну залежність при R^2 = 0,627. Кореляція NDVI з PRI досить значна R^2= 0,9283. Порівняно значення (sPRI × NDVI) зі значеннями чистого потоку CO_2 (тобто чисті потоки вимірюються без поправки на дихання), щоб побачити, чи будуть вони

корелювати. Результуюча величина R^2 = 0,5974, тобто кореляція, виявилася середньою. Порівняння сумарного потоку CO_2 з добутком (sPRI × NDVI) показало більш значну кореляцію з R^2 = 0,6148. Лінійна залежність, отримана за допомогою рівняння (4) з сумарним потоком CO_2, дозволила скласти рівняння (5), за яким можна попередньо обчислювати абсорбцію CO_2 агрокультурами Лісостепової зони України (рис. 5):

$$CO_2 = -4{,}093 - 26{,}631 \times (sPRI \times NDVI). \quad (5)$$

Вперше в Україні на основі полігонних інструментальних вимірювань запропоновано рівняння оцінки регресійної залежності інтенсивності поглинання CO_2 рослинним покривом від його спектральних характеристик для агроценозів Лісостепової зони. **Це дозволяє одержувати достатньо надійні дистанційні оцінки потоків CO_2, що може дати можливість для України уточнювати квоти торгівлі парниковими газами згідно Кіотського протоколу та Паризького саміту (2015 р.).** У підрозділі 4.4. *Аналіз та порівняння вегетаційних індексів посівів озимої пшениці в умовах Лісостепової зони України (Київський полігон ДЗЗ) – Лісостеп* досліджено десять вегетаційних індексів, обчислених одночасно як за супутниковими даними Sentinel-2 (рис. 7), так і за результатами наземного спектрометрування приладом FieldSpec3FR. Було обрано тотожні за географічними координатами ділянки виробничих посівів озимої пшениці двох сортів Богдана і Скаген. Виявлено, що значення більшості досліджених вегетаційних індексів (NDVI, табл. 3, рис. 8) за супутниковими даними місії Sentinel-2 близькі за величиною до аналогічних індексів, обчислених за вузькими спектральними каналами FieldSpec3FR, за винятком DRI_{CI} (Double Ratio Index for chlorophyll index) та CI_{green} (ratio green Chlorophyll Index), значення яких за супутниковими каналами значно нижчі, ніж за показниками спектрорадіометра. Продемонстровано, що розбіжності BI за Sentinel-2 та FieldSpec3FR залежать від фази розвитку рослин озимої пшениці: впродовж вегетації коефіцієнти кореляції між ними зростають для посівів обох досліджуваних сортів.

Таблиця 3

Значення вегетаційних індексів, обчислених за даними Sentinel-2, для сільськогосподарських угідь полігону «Березань» (08.04.2016 р.)

Дата зйомки	№ поля	Агрокультура, сорт	Значення вегетаційного індексу NDVI
08.04.2016	1	Пшениця Скаген	0,345
Середні значення індексів (т. 1)			0,351
08.04.2016	2	Пшениця Богдана	0,368
Середні значення індексів (т. 2)			0,407

У підрозділі 4.5. *Виявлення просочування вуглеводнів за допомогою методів: варіації індексів червоного краю, індексів у SWIR-області та спектрометричної індикації спектрів відбиття пшениці (Кримський полігон ДЗЗ) – Степ* визначено варіації спектрометричних коефіцієнтів відбиття пшениці, мерісівського наземного хлорофільного індексу TCI та позиції червоного краю REP за польовими даними спектрорадіометра FieldSpec3FR під впливом просочування

природного газу над Глібовським газовим родовищем-сховищем. Встановлено сильну кореляцію між REP і TCI із коефіцієнтом r = 0,987 та зменшення величин цих індексів на газоносній території щодо їх фонових значень за межами родовища. Вперше проведено дослідження наявності аномалій індексів червоного краю REP та TCI, обчислених за гіперспектральними даними спектрометрування пшениці над покладом вуглеводнів Глібовського газового родовища спектрорадіометром FieldSpec3FR. В результаті досліджень встановлено, що стан рослин зазнає впливу аномальних концентрацій газу в ґрунті, що відображається в спектрах відбиття в зоні червоного краю зменшенням коефіцієнтів відбиття в ближній інфрачервоній зоні спектра та збільшенням – у червоній (рис. 6). Досліджено характер змін індексів червоного краю: позиції червоного краю REP та наземного хлорофільного індексу TCI спектрів відбиття пшениці з метою виявлення пошукового сигналу над покладами вуглеводнів. Встановлено, що в місцях аномально високих концентрацій газоподібних вуглеводнів у ґрунті значення REP та TCI зменшуються порівняно із їх значеннями для фонової ділянки за межами родовища. Таким чином, гіперспектральне дистанційне зондування рослинного покриву над родовищами газу може бути використане для визначення цих змін. Особливо ефективним є метод комплексного використання двох вегетаційних індексів REP та TCI, які мають високий коефіцієнт кореляції r=0,987. Реагуючи на зміну вмісту хлорофілу в рослинах зменшенням їх величин над покладом в порівнянні з фоновими значеннями за межами покладу, вони можуть виявляти вегетаційні стреси в місцях збільшених концентрацій природного газу в ґрунті і, таким чином, слугувати нафтогазопошуковими індексами.

Вперше в Україні досліджено зміни гіперспектральних індексу HD (Hydrocarbon Detection) та індексу HI (Hydrocarbon Index) за даними спектрометрування наземного покриву над Приозерним нафтовим родовищем спектрорадіометром FieldSpec3FR з метою виявлення нафтовмісних ґрунтів без рослинного покриву для визначення нафтовмісних та забруднених нафтопродуктами ґрунтів. Який визначається за формулою (Kuehn et al., 2004; Li et al., 2005):

$$HI = (\lambda_B - \lambda_A)\frac{R_C - R_A}{\lambda_C - \lambda_A} + R_A - R_B, \qquad (6)$$

де довжина хвилі λ має такі значення: λ_A = 1705 нм, λ_B =1729 нм і λ_C = 1741 нм; R_A, R_B, R_C – величини коефіцієнтів відбиття для відповідних довжин хвиль. Локальний мінімум спектра на довжині хвилі λ_B = 1729 нм повинен задовольнити умову:

$$R_B < R_A \text{ та } R_B < R_C, \qquad (7)$$

Якщо значення HI > 0 і виконується умова (7), то це є показником наявності нафти у ґрунті.

Другий вуглеводний індекс HD (Hydrocarbon Detection) запропоновано для локальних мінімумів спектрів відбиття в межах довжини хвилі 2310 нм. Обчислення індексу HD залежить від сенсора, яким вимірюють спектри відбиття наземного покриву. В даній роботі значення HD обчислюються за формулою:

$$HD = \frac{R(2290) + R(2330)}{2R(2310)}, \quad (8)$$

де *R(λ)* – величина коефіцієнта відбиття на довжині хвилі λ, λ *є* 2290 нм, 2310 нм, 2330 нм. Якщо HD > 1 і точка λ = 2310 нм є точкою локального мінімуму (тобто відбувається абсорбція нафти), про що свідчить виконання такої умови:

$$R(2310) < R(2330) \text{ і } R(2310) < R(2290), \quad (9),$$

то ґрунт є нафтовмісним, нафтонасиченим або забрудненим нафтою. Якщо ж HD ≤ 1 або HD > 1, але умова (9) не виконується, то ґрунт не містить нафтопродуктів. Встановлено, що виконання умови HI > 1, як і HD > 0, не є достатнім для визначення нафтовмісних ґрунтів без перевірки наявності у спектрах відбиття характеристик абсорбції нафти у вигляді локальних мінімумів спектрів у межах довжин хвиль 1700 і 2310 нм. При наявності локальних мінімумів у межах довжин хвиль 1700 і 2310 нм у спектрах відбиття покриву і виконанні умов HI > 1 і HD > 0 значення індексів HI та HD можуть слугувати індикаторами нафтонасичених та забруднених нафтою ґрунтів без рослинного покриву. Використання згаданих індексів для виявлення нафтових забруднень наземного покриву без рослинності є дуже важливим і потребує подальших досліджень.

На основі отриманих даних на Глібовському газосховищі (Кримський полігон ДЗЗ) зроблено **винахід,** що належить до нафтогазової галузі – пошуку й розвідки покладів вуглеводнів. Теоретичні передумови способу базуються на положеннях, що фізіологічний стан рослин та їхні оптичні характеристики визначаються сукупністю факторів навколишнього середовища. Такими факторами є аномальні геологічні, геофізичні, геохімічні і біохімічні поля в межах покладів вуглеводнів. Виявлення аномалій визначається за фітоіндикаційним показником листяного покриву шляхом спектрометрування та обчислюється за розмірністю спектрограм покриву шляхом належного їх масштабування і перетворень. Спосіб спектрометричної індикації виявлення аномалій природного та антропогенного походження, фізичною основою якого є наявність зв’язку між параметрами ділянок досліджуваної території – геологічними, геофізичними, геохімічними і біохімічними полями та їх аномаліями в межах покладів вуглеводнів, полягає у наземному спектрометруванні відібраних зразків рослинності. Далі за критерієм статистичного розподілу спектрограм визначають точки межі покладу вуглеводнів на кожному з маршрутів. За результатами наземного контактного спектрометрування листяного покриву визначають аномалію біохімічного поля для уточнення межі покладу. Для визначення аномалії обчислюють індикаторну ознаку — фітоіндикаційний показник, що враховує розмірність спектрограм листяного покриву. Для обчислення показника і розмірності спектрограми масштабують та визначають степеневу залежність спектрометричної міри від рівнів квантування спектрограм. Фітоіндикаційний показник істотно збільшує своє значення на аномальних ділянках. За відхиленням його значень від значень на еталонній, без аномалій ділянці виявляють область аномалій.

ВИСНОВКИ

У дисертації подано теоретичне узагальнення і запропоновано нове вирішення наукової задачі, що полягала в обґрунтуванні вибору тестових ділянок земної поверхні України для верифікації матеріалів космічної зйомки з метою підвищення достовірності дослідження геологічного середовища у приповерхневих шарах літосфери. Основні результати дослідження такі:

1. Розроблено концептуальний алгоритм проведення досліджень по наземній верифікації матеріалів космічних багатоспектральних (гіперспектральних) зйомок.

2. Обґрунтовано методику експертних оцінок для визначення характеристик довкілля наземних завіркових полігонів ДЗЗ. На цій основі вибрано шість полігонів (Київський-міський та Київський-обласний, Шацький, Вінницький, Миколаївський та Кримський (Тарханкут)) для верифікації результатів космічного геомоніторингу.

3. Встановлено, що величина REP для спектрів відбиття наземного покриву суттєво залежить від методу обчислень. Так, у методі поліноміальної апроксимації спектральних коефіцієнтів відбиття пирію за даними наземної зйомки величина REP істотно залежить від степеня апроксимуючого полінома. Зіставлення значень REP-спектрів пирію, обчислених методом чотириточкової лінійної інтерполяції та поліноміальної апроксимації при використанні поліномів 5-го степеня, показало оптимальність методу чотириточкової лінійної інтерполяції щодо часу обчислень та кількості вхідних даних, що має суттєве значення при попіксельному обчисленні значень REP для побудови REP-зображень за даними космознімання.

4. Встановлено взаємозв’язок між величинами REP і TCI на підставі лінійної регресії, що свідчить про потенційну можливість вегетаційного індексу TCI слугувати індикатором вегетаційного стресу і доцільність подальшого його дослідження для вивчення особливостей трав’яного покриву за космознімками сенсорів, які мають у зоні червоного краю лише три канали, необхідні для визначення TCI, як, наприклад, космічний апарат *Rapid Eye*.

5. Показано, що параметри орбіт раціонального угруповання космічних апаратів можуть бути використані для попередньої оцінки обґрунтування можливості бути реалізованими у космічних проектах. Показано, що час повторного огляду всіх об'єктів, розташованих на території України, становить близько 2,7 доби.

6. Отримано спектральні характеристики відбиття довкілля природного та антропогенного походження для вибраних тестових ділянок і створено відповідну спектрометричну базу даних. Наведено розроблене в ході роботи методичне забезпечення електронної бази спектрально-часових характеристик.

7. За даними високоточного спектрометрування в польових умовах на дрібноділянкових посівах демонстраційного полігону елітного насіннєвого господарства «Золотий колос» у Миколаївській області розраховано вегетаційні індекси червоного краю для двох різновидів озимої пшениці.

8. **Вперше** в Україні проведено синхронні газометричні та спектрометричні наземні вимірювання абсорбції CO_2 та встановлено емпіричну залежність між цими вимірами. Це дає можливість покращення результатів космічних зйомок при визначенні кругообігу CO_2 в системі “атмосфера-рослинність”. Запропоновано регресійне рівняння для деяких конкретних агроценозів Лісостепової зони України.

9. **Вперше** проведено дослідження наявності аномалій індексів червоного краю REP та TCI, обчислених за гіперспектральними даними спектрометрування пшениці над покладом вуглеводнів Глібовського газового родовища спектрорадіометром FieldSpec3FR. В результаті досліджень встановлено, що вплив аномальних концентрацій газу в ґрунті відображається в спектрах відбиття в зоні червоного краю зменшенням коефіцієнтів відбиття в ближній інфрачервоній зоні спектра та збільшенням – у червоній.

Таким чином, гіперспектральне дистанційне зондування рослинного покриву над родовищами газу може бути використане для визначення цих змін. Особливо ефективним є метод комплексного використання двох вегетаційних індексів REP та TCI, які мають високий коефіцієнт кореляції r = 0,987. Реагуючи на зміну вмісту хлорофілу в рослинах зменшенням їх величин над покладом в порівнянні з фоновими значеннями за межами покладу, вони можуть виявляти вегетаційні стреси в місцях збільшених концентрацій природного газу в ґрунті і, таким чином, слугувати **нафтогазопошуковими індексами**.

10. Проведено дослідження змін вегетаційних індексів червоного краю REP і TCI, обчислених за гіперспектральними даними спектрометрування наземного покриву спектрорадіометром FieldSpec3FR, над нафтовим родовищем Приозерне та за його межами з метою виявлення пошукового сигналу.

Результати досліджень вказують на те, що комплексне використання гіперспектральних індексів REP і TCI у області червоного краю можна вважати методом виявлення вегетаційних стресів у місцях **аномальних концентрацій вуглеводнів в ґрунті, а ці індекси можуть виступати як нафтогазопошукові.**

11. **Вперше** проведено дослідження вуглеводних індексів HI (Hydrocarbon Index) та HD (Hydrocarbon Detection) у SWIR-області спектрів відбиття за даними спектрометрування наземного покриву спектрометром FieldSpec3FR. Вивчався наземний покрив над нафтовим родовищем Приозерне з метою виявлення нафтонасичених та забруднених нафтою ґрунтів без рослинного покриву.

Зроблено винахід, що належить до нафтогазової галузі – пошуку й розвідки покладів вуглеводнів. Теоретичні передумови способу базуються на положеннях, що фізіологічний стан рослин та їхні оптичні характеристики визначаються сукупністю факторів навколишнього середовища. Такими факторами є аномальні геологічні, геофізичні, геохімічні і біохімічні поля в межах покладів вуглеводнів. Виявлення аномалій визначається за фітоіндикаційним показником листяного покриву шляхом спектрометрування та обчислюється за фрактальною розмірністю спектрограм покриву шляхом належного їх масштабування і перетворень, що **підтверджено патентом України на винахід № 104340.**

У подальшому, з урахуванням отриманого досвіду, передбачається продовжити спектрометричні дослідження інших завіркових полігонів ДЗЗ

України з метою їх оцінки і використання для наземної верифікації даних космічного геомоніторингу. Бажано також спрямувати дослідження на визначення впливу теплового режиму на спектральні характеристики рослинності, враховуючи відповідні кліматичні зміни в умовах регіонального потепління.

ANNOTATION

Dugin S.S. Justification of the choice of test plots of ground verification of the information space Geo Monitoring in Ukraine. - Manuscript**.**

The thesis for the degree of candidate of geological sciences on specialty 05.07.12 - Remote aerospace research. - State Institution "Scientific Center for Aerospace Research of the Earth of IGS NAS of Ukraine", Kyiv, 2017.

Although today there are the great developments in the sphere of remote sensing geo-monitoring for the area of Ukraine some unresolved issues of major importance remain among those are the followings:

1. Verification of satellite information for remote sensing of the area of Ukraine by means of the creation of test sites for the verification of multiband (hyperspectral) data of satellite monitoring.

2. The experimental studies of the ground spectrometric information relative to the features of the natural and anthropogenic components for the test sites in Ukraine and creation of the proper basis of spectral features of environment.

3. Resolution of the thematic problems of natural resource management on a basis of revealed spectrometric information of satellite geo-monitoring in view of the ground verification of above information.

Thus the subject-matter literature review shows that the methods of creation of test sites in the main physiographic zones of geological surroundings of Ukraine are poorly developed. This made it necessary to choose the above mentioned dissertation subject.

Introduction substantiates the thesis actuality relative to the choice of the test sites, indicates the connection of this research with the scientific programs, defines the goals and problems of the study for the verification of satellite geomonitoring data, shows the novelty and practical relevance of the results, informs on the author's contribution, approbation of this study, denotes the Conferences, where the main results from the thesis are reported.

The thesis is devoted to the selection of the earth test sites surface space for the verification of space information to increase the reliability of the geological environment research in the surface layers of the lithosphere. Justified expert estimations to select test sites.

Carried out comparative analysis of the spectrometric characteristics of the landscape and geological features of Ukraine, thematic tasks of nature and space monitoring systems, which are formed as a result of the requirements for the selection of test sites.

Carried out expert assessments for six major remote sensing polygons taking into account various landscape and geological conditions of Ukraine. Ob- tained the spectral characteristics of reflection of natural and anthropogenic origin for selected test sites and created the corresponding spectrometry database. Carried out synchronized

gasometrical and spectrometric ground-based measurements of CO_2 absorption, established an empirical dependency between these measurements. This makes it possible to increase the accuracy of the results satellite imagery in the determination of the CO_2 cycle in the system "atmosphere-vegetation".

Achieved the approbation variation indexes red edge reflectance spectra of wheat under the influence of the hydrocarbon leaks on the ground of chlorophyll index on oil and gas deposits. Been revealed anomalies of natural and anthropogenic origin on the basis spectrometric information.

Keywords: Earth remote sensing, geological environment, polygon study materials of aerospace survey, carbon cycle, environmental management.

АНОТАЦІЯ

Дугін С.С. Обґрунтування вибору тестових ділянок для наземної верифікації інформації космічного геомоніторингу території України. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата геологічних наук за спеціальністю 05.07.12 – Дистанційні аерокосмічні дослідження. – Державна установа “Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України”, Київ, 2017.

Дисертаційну роботу присвячено вибору тестових ділянок земної поверхні для верифікації космічної інформації з метою підвищення достовірності дослідження геологічного середовища у приповерхневих шарах літосфери. Обґрунтовано експертні оцінки для вибору тестових ділянок.

Здійснено порівняльний аналіз спектрометричних характеристик ландшафтно-геологічних особливостей України, тематичних задач природокористування та космічних систем спостереження, у результаті якого сформульовані вимоги до тестових ділянок.

Виконано експертні оцінки для шести основних полігонів ДЗЗ з урахуванням різних ландшафтно-геологічних умов України. Отримано спектральні характеристики відбиття природного та антропогенного походження для вибраних тестових ділянок і створено відповідну спектрометричну базу даних. Проведено синхронні газометричні та спектрометричні наземні вимірювання абсорбції CO_2 та встановлено емпіричну залежність між цими вимірами. Це дає можливість покращення результатів космічних зйомок при визначенні кругообігу CO_2 в системі “атмосфера-рослинність”.

Виконано апробацію варіацій індексів червоного краю спектрів відбиття пшениці під впливом просочування вуглеводнів на наземний хлорофільний індекс над родовищами нафти та газу. Виявлено аномалії природного та антропогенного походження на основі спектрометричної інформації.

Ключові слова: дистанційне зондування Землі, геологічне середовище, полігонні дослідження, матеріали аерокосмічної зйомки, кругообіг вуглецю, раціональне природокористування.

АННОТАЦИЯ

Дугин С.С. Обоснование выбора тестовых участков для наземной верификации информации космического геомониторинга территории Украины. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата геологических наук по специальности 05.07.12 – Дистанционные аэрокосмические исследования. – Государственное учреждение «Научный центр аэрокосмических исследований Земли ИГН НАН Украины", Киев, 2017.

Диссертационная работа посвящена выбору тестовых участков земной поверхности для верификации космической информации с целью повышения достоверности исследования геологической среды в приповерхностных слоях литосферы. Обоснованы экспертные оценки для выбора тестовых участков.

Осуществлен сравнительный анализ спектрометрических характеристик ландшафтно-геологических особенностей Украины, тематических задач природопользования и космических систем наблюдения, в результате которого сформулированы требования к выбору тестовых участков.

Выполнены экспертные оценки для шести основных полигонов ДЗЗ с учетом различных ландшафтно-геологических условий Украины. Получены спектральные характеристики отражения природного и антропогенного происхождения для выбранных тестовых участков и создана соответствующая спектрометрическая база данных. Проведены синхронные газометрические и спектрометрические наземные измерения абсорбции CO_2, установлена эмпирическая зависимость между этими измерениями. Это дает возможность повысить достоверность результатов космических съемок при определении круговорота CO_2 в системе "атмосфера-растительность". Выполнена апробация вариации индексов красного края спектров отражения пшеницы под влиянием утечки углеводородов на наземный хлорофильный индекс над месторождениями нефти и газа. Выявлены аномалии природного и антропогенного происхождения на основе спектрометрической информации.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, геологическая среда, полигонные исследования, материалы аэрокосмической съемки, круговорот углерода, рациональное природопользование.