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

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

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ДУГІН СТАНІСЛАВ СЕРГІЙОВИЧ

УДК 528.88.04:504.064.2(477)

ДИСЕРТАЦІЯ

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

05.07.12 – Дистанційні аерокосмічні дослідження
Геологічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня **кандидата геологічних наук**

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело
_____ С.С. Дугін

Науковий керівник: Федоровський Олександр Дмитрович, доктор фізико-математичних наук, професор, член-кореспондент НАН України

Київ – 2017

АНОТАЦІЯ

Дугін С.С. Обґрунтування вибору тестових ділянок для наземної верифікації даних космічного геомоніторингу території України. – Кваліфікаційна наукова праця 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», (Д 26.162.03 Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України»), Київ, 2017.

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.
2. Вивчення властивостей природних та антропогенних складових тестових ділянок України на основі спектрометричної інформації та створення відповідної бази спектральних характеристик довкілля.
3. Вирішення тематичних задач природокористування на основі одержаних спектрометричних даних космічного геомоніторингу з урахуванням наземної верифікації вказаної інформації.

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.

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.

Дисертаційну роботу присвячено вибору тестових ділянок земної поверхні для верифікації матеріалів космічних зйомок території України 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 довкілля 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.

ANNOTATION

Dugin S.S. Substantiation for the test sites selection for the ground verification of satellite geo-monitoring data of the area of Ukraine. – Qualified scientific paper as manuscript copyright.

Dissertation for the degree of candidate of geological sciences (PhD) with a degree in 05.07.12 (D 26.162.03 – Remote Sensing Aerospace Research) State Institution «Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth of Institute of Geological Science of National Academy of Sciences of Ukraine», Kyiv 2017.

Urgency of the research

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.

Публікації здобувача

Основні наукові результати дисертації відображені в опублікованих зі співавторами і особистих наукових працях.

Монографії:

1. Изменение земных систем в Восточной Европе: Лялько В.И. (ред.). Киев: Фолиант, 2010. 582 с.

2. Earth Systems Change over Eastern Europe. Coeditors P., Lyalko V. (Eds.). Kiev: Akademperiodyka, 2012. 488 p. ISBN 978-966-360-195-3.

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.

Основні публікації за темою дисертаційної роботи:

4. **Дугін С.С.** Оцінка і вибір полігонів для наземної завірки інформації космічного геомоніторингу. *Доп. НАН України*. 2014. № 5. С. 87-95.

5. Шпортюк З.М., Сибірцева О.М., **Дугін С.С.** Вплив просочування природного газу на наземних хлорофільний індекс та позицію червоного краю спектрів відбиття пшениці над газовим родовищем. *Доп. НАН України.* 2011. № 11. С. 115-119.

6. 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.

7. 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.

8. 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.

9. 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.

10. 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.

11. 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.

12. 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.

13. 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 гіперспектральних індексів HD та HI, що можуть слугувати нафтогазопошуковими.

14. 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.

Наукові конференції:

15. 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.

16. 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.

17. 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.

18. 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.

19. 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.

20. 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.

21. 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:

22. 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 технологі*я. 2010. Т. 16, № 3. С. 39-45.

23. Артюшенко М.В., **Дугін 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.

24. 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.

25. 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.

26. 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.

Патент:

27. 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.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ……. 2

ЗМІСТ…….. 11

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ…… 14

ВСТУП…….. 16

РОЗДІЛ 1. Основні передумови вибору тестових ділянок для наземної верифікації даних космічного геомоніторингу території України…….. 29

1.1. Геолого-географічні особливості вибору тестових ділянок… 29

1.2. Вимоги до тестових ділянок наземної верифікації даних ДЗЗ. 30

Висновки до першого розділу……. 35

Список використаних джерел до першого розділу…… 36

РОЗДІЛ 2. Обґрунтування вимог для проведення досліджень на тестових ділянках верифікації даних космічного геомоніторингу території України…….. 43

2.1. Методичні основи наземної верифікації космічної інформації ДЗЗ……. 43

2.2. Аналіз інформативних ознак досліджуваних природних процесів і об'єктів для задач природокористування на основі космічних зйомок…….. 50

2.3. Апаратура наземних досліджень: 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 та польовий спектрорадіометр ASD FieldSpec3FR……. 54

Висновки до другого розділу ……. 57

Список використаних джерел до другого розділу…… 58

РОЗДІЛ 3. Порівняльний аналіз характеристик тематичних задач

природокористування і тестових ділянок ДЗЗ у різних ландшафтно-геологічних умовах України…… 66
3.1. Особливості вибору і оцінки мережі тестових ділянок (полігонів) ДЗЗ для верифікації даних космічного геомоніторингу в Україні ……. 68
3.2. Приклад верифікації гіперспектральних супутникових та наземних даних на Київському полігоні (тестовій ділянці) ДЗЗ…… 89
3.3. Вибір параметрів орбітальної системи КА, яка мінімізує розриви спостереження на тестових ділянках (полігонах) ДЗЗ. 104
Висновки до третього розділу …… 108
Список використаних джерел до третього розділу……... 112
РОЗДІЛ 4. Апробація та верифікація тематичних задач природокористування на вибраних полігонах ДЗЗ …… 115
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 …… 115
4.2. Виявлення особливостей вегетаційних індексів спектрів відбиття різних сортів посівів озимої пшениці в умовах Степової зони України (Миколаївський полігон ДЗЗ) – Степ... 118
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…… 126
4.4. Аналіз та порівняння вегетаційних індексів посівів озимої пшениці в умовах Лісостепової зони України (Київський полігон ДЗЗ) – Лісостеп…… 135
4.5. Виявлення просочування глибинних вуглеводнів за

допомогою методів: варіації індексів червоного краю, індексів у SWIR-області та спектрометричної індикації спектрів відбиття пшениці (Кримський полігон ДЗЗ) – Степ…….. 148
Висновки до четвертого розділу ……... 171
Список використаних джерел до четвертого розділу……...…… 173
ВИСНОВКИ……. 182
ДОДАТКИ…… 188
Додаток А…….. 188
Додаток Б…… 190
Додаток В…… 192
Додаток Г…… 193
Додаток Д…… 195
Додаток Ж……... 212
Додаток З…… 213

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

CLC	Європейська система класифікації земних покривів (CORINE Land Cover)
LAI	Листковий індекс (Leaf Area Index)
NDVI	Вегетаційний нормалізовано-різницевий індекс (Normalized Difference Vegetation Index)
NIR (БІЧ)	Близькочервоний діапазон
NPP	Первинна продуктивність (Net Primary Productivity)
PAR	Фотосинтетично активне випромінювання (Photosynthetically Active Radiation)
PRI	Фотосинтетичний індекс відбиття
REP	Індекс як позиція червоного краю (Red Edge Position)
RT	Час повторного огляду (Revisit time)
SWIR	Short Wave Infrared – діапазон, де довжина хвилі понад 1000 нм
TCI	Мерісівський наземний хлорофільний індекс (MERIS Terrestrial Chlorophyll Index)
БД	База даних
ВВ	Вуглеводні
ВІ	Вегетаційний індекс
ВУ	Відносна узгодженість
ГІС	Геоінформаційна система
ГРР	Геологорозвідувальні роботи
ГС	Геологічне середовище
ДЗЗ	Дистанційне зондування Землі
ЄКА	Європейське космічне агентство
ІГН	Інститут геологічних наук

ІУ	Індекс узгодженості
ІФРГ	Інститут фізіології рослин та генетики
ІЧ	Інфрачервоний діапазон
КА	Космічний апарат
КГМ	Космічний геомоніторинг
КЗ	Космічний знімок
КСЯ	Коефіцієнт спектральної яскравості
МАІ	Метод аналізу ієрархій
НАН	Національна академія наук
НС	Надзвичайна ситуація
ОП	Озима пшениця
РП	Рослинний покрив
СКБД	Системи керування базами даних
СУ	Середньостатистичне значення індексу узгодженості
УФ	Ультрафіолетовий діапазон
ЦАКДЗ	Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі
ШСЗ	Штучний супутник Землі

ВСТУП

Актуальність теми

Незважаючи на існування багатьох різних методів та засобів дистанційного геомоніторингу території України (додаток А), ще залишаються невирішеними деякі важливі питання, серед яких такі:

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

Практика показує, що достовірність і точність інформації КЗ (КЗ) 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.). [1-4].

2. Вивчення властивостей природних та антропогенних складових тестових ділянок України на основі спектрометричної інформації та створення відповідної бази спектральних характеристик довкілля. [1-4].

ДЗЗ за допомогою супутникових гіперспектральних сенсорів є потужним інструментом для тривалого геомоніторингу рослинного покриву (РП). Порівняно з традиційними багатоспектральними даними гіперспектральні дані пропонують нові спектральні характеристики, зокрема такий індекс, як позиція червоного краю REP (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” [1, 4-12].

Потужним інструментом для геомоніторингу земної поверхні, зокрема, РП 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 КГМ 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 (БД) про спектральні сигнатури об'єктів ДЗЗ та проведення інших досліджень [13, 14].

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 (ГС), в тому числі пошуку корисних копалин, кліматології, оцінці антропогенного навантаження та надзвичайних ситуацій (НС) тощо. Однак вивчення багатьох фахових публікацій показує, що методи створення тестових ділянок для вивчення ГС України в основних фізико-географічних зонах розроблені ще недостатньо. Це і зумовило вибір теми дисертаційного дослідження.

Дана дисертаційна робота відображена у публікаціях, наведених у першому розділі [13-39], присвячена обґрунтуванню вибору тестових ділянок для наземної верифікації інформації КГМ 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 ДЗЗ 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 геомоніторингу 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 КГМ 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 ГС в межах фізико-географічних зон України з використанням ДЗЗ.

Об'єкт дослідження – КГМ території України.

Предмет дослідження – тестові ділянки для наземної верифікації даних КГМ 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 спектрарадіометр 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 вибору тестових ділянок для спектрометричної верифікації даних КГМ.

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 БД.

Набули подальшого розвитку:

– Методи з розв’язання задач природокористування на основі спектрометричної інформації КГМ 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 (ВВ) 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 (ОП) у польових умовах Степової та Лісостепової зон України. Зіставлено супутникові та наземні гіперспектральні дані при визначенні змін позиції червоного краю над РП 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 БД 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 РП 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 публікацій. Участь у постановці задачі зі створення полігонів ДЗЗ, проведення розрахунків та аналізу результатів польових досліджень, обговоренні їх із співавторами, формулювання висновків. Також дисертантом були самостійно оброблені та систематизовані матеріали власних досліджень: дані тематичного дешифрування 67 КЗ *Landsat 5, 7, 8, ASTER, RapidEye*, *Hyperion*, *Sentinel* за період 2002-2016 рр.; дані польових досліджень 2007-2016 рр. у межах шести основних полігонів України на 160 тестових ділянках та отримано близько 26 тисяч спектрів відбиття земної поверхні та інші завіркові дані. У процесі

виконання дисертаційної роботи автором проведено аналіз наявних наземних даних.

Основні наукові результати дисертації відображені в опублікованих зі співавторами та особистих наукових працях. Конкретний внесок здобувача полягав у наступному:

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 спектрогазометричних 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 КГМ.
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 гіперспектральних індексів 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:

1. 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.

2. 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.

3. 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 ОП.

4. 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.

5. 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.

РОЗДІЛ 1

ОСНОВНІ ПЕРЕДУМОВИ ВИБОРУ ТЕСТОВИХ ДІЛЯНОК ДЛЯ НАЗЕМНОЇ ВЕРИФІКАЦІЇ ДАНИХ КОСМІЧНОГО ГЕОМОНІТОРИНГУ ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ

Розглядаємо тестові ділянки (полігони) ДЗЗ, які використовуються для розробки і сертифікації методик розв’язання тематичних задач ДЗЗ, створення і поповнення комп'ютерних БД 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 та ін.). Ці характеристики використовуються при інтерпретації зображень в якості атрибутивних ознак відповідного класу об'єктів. Це суттєво доповнює й уточнює на кількісному рівні наші знання про стан довкілля та верифікацію даних КГМ території України [1, 13 ,14].

1.1. Геолого-географічні особливості вибору тестових ділянок

Проведено аналіз розташування полігонів ДЗЗ. Більшість спеціально обладнаних полігонів ДЗЗ розташовані на суші. При цьому зазвичай вони функціонують на базі існуючих заповідників, лісництв, дослідних господарств, ботанічних садів і т.д., що забезпечує економію засобів і кваліфіковане обслуговування [5, 6]. Разом з тим у деяких проектах ДЗЗ в якості полігонів використовують на період виконання проекту природні наземні об’єкти, про яких є вся необхідна і досить достовірна інформація. Виходячи з необхідності забезпечення, відповідно до поставленої мети, регіонального і безперервного геомоніторингу навколишнього природного середовища, одним з основних джерел даних розглядаються технічні засоби ДЗЗ. За допомогою засобів ДЗЗ космічного базування (бортових сенсорів) формуються високоякісні зображення, аналіз і інтерпретація яких дозволяють отримувати актуальну (оперативну) інформацію про стан земної суші, океану й атмосфери, фіксувати і

вивчати природі зміни і т.д. [3, 4]. Практика показує, що достовірність і точність, які одержуються з космічних зображень інформації, залежать від наявності і повноти відповідних наземних польових даних. Польові дані отримують методом наземних фізичних, геохімічних, фітоіндикаційних, геометричних вимірювань або за допомогою безпосереднього спостереження й обстеження об'єктів, що надає таким даним більш високу точність в порівнянні з даними ДЗЗ. Ці польові дані дозволяють використовувати останні як опорні (калібрувальні, завіркові) у процесі формування, обробки та інтерпретації космічних зображень (рис. 1.1) [13, 14].

1.2. Вимоги до тестових ділянок наземної верифікації даних ДЗЗ

Проведено аналітичний огляд стану досліджень тестових ділянок для наземної верифікації даних КЗ на території України, розглянуто теоретичні аспекти застосування дистанційних методів у даних дослідженнях, геолого-географічні особливості вибору тестових ділянок на території України, розроблено вимоги до тестових ділянок наземної верифікації даних ДЗЗ. Щоб максимально відповідати своєму призначенню і забезпечувати достатню інформаційну підтримку дистанційним вимірам і спостереженням, полігон ДЗЗ повинен відповідати певним вимогам. Ці вимоги можна розділити на такі категорії: структура, випромінювальні-відбивні характеристики, географічне розташування і розміри, методичне і технічне забезпечення, сертифікація. Розглянемо реалізацію вказаних вимог на прикладі Шацького полігону ДЗЗ (рис. 1.1).

Сертифікація. Шацький контрольно-калібрувальний полігон ДЗЗ створено в 2007 р. на базі Шацького національного природного парку (ШНПП) [39], який є складовою частиною трансграничного біосферного резервату «Західне Полісся», що включає територію і Бєларусі (Прибузьке Полісся), і Польщі (Поліський парк Народовий). На полігоні проведено польові дослідження і камеральну обробку різних за просторовою розрізненністю і

Рис. 1.1. Райони розташування мережі основних завіркових полігонів ДЗЗ України: 1. Шацький – Полісся; 2. Київський – Лісостеп; 3. Вінницький – Лісостеп; 4. Миколаївський – Степ; 5. Кримський – Степ; 6. Карпатський – Гірський

кількістю спектральних каналів дистанційних матеріалів з метою розробки методики оброблення, класифікації та аналізу космічного зображення. В Україні загальні положення і порядок сертифікації викладені в стандартах [40-44].

При виборі місця наземного розташування Шацького контрольно-калібрувального полігону враховано ряд факторів, а саме: ландшафтно-кліматичні та геоморфологічні особливості даної території є типовими для Західного Полісся (Волинська і Рівненська області), оскільки місцевий клімат, рослинність і рельєф утворюють характерну структуру ландшафтів, що визначає структуру полігону і склад тестових об'єктів; загальна площа полігону та його межі збігаються з межами і охоплюють основні типи земних покривів цього регіону; мозаїчність ландшафтних комплексів, чергування відкритих, залісених і водних поверхонь, відносно плоский рельєф сприяють

використанню цієї території як для калібрувально-завіркових, так і для тестових досліджень; на території протягом багатьох років проведено значну кількість науково-дослідницьких робіт, накопичено і продовжує накопичуватися інформація про стан клімату, ґрунтів, флори і фауни та характеристики окремих біотопів; проведено моніторингові дослідження екосистем, їх зміни під впливом рекреаційної діяльності; виконано роботи з вивчення біотопів та екологічного стану даної заповідної території у тісній співпраці з науковцями ШНПП та інших науково-дослідних організацій, що полегшало ідентифікацію природних об’єктів і явищ та вибір тестових ділянок.

Кожен клас представляється однією або кількома тестовими ділянками, до яких висуваються дві основні вимоги: а) сумарна кількість складових елементарних одиниць (елементів) повинна бути статистично достатньою; б) ділянки мають бути максимально однорідними, тобто не ”засміченими” представниками інших класів. Європейська система класифікації земних покривів (CORINE Land Cover) була адаптована для умов України (додаток Б).

Відповідно до міжнародних правил, кожен полігон ДЗЗ проходить процедуру сертифікації і паспортизується [3, 6, 44]. Сертифікацію Шацького полігону ДЗЗ здійснено шляхом розробки та заповнення паспортів власне полігону ДЗЗ, паспортів тестових ділянок класів та паспортів елементів ділянки полігону.

Паспорт. Шацький полігон ДЗЗ містить: загальні дані (назва, час створення, географічне положення, площа, перелік тестових або калібрувальних об'єктів, адміністративно-територіальна і відомча належність, позиційність щодо водних об'єктів, лісових масивів; антропогенно-природні об'єкти, типи землекористування і господарювання на території, фітоценоз і т. д.); іконічну інформацію (топографічні карти, цифрова модель рельєфу, різночасові аерокосмічні знімки полігону і матеріали наземної зйомки, геоботанічна карта, фондові матеріали); загальну ландшафтну і геологічну інформацію (районування, домінуючі біотопи та їх співвідношення, поверхневі і приповерхневі відклади, РП і стан ґрунту, гідрологічні й кліматичні

особливості, такі як середня кількість днів у році з опадами і туманами, дати формування і сходу снігового покриву); гідрологічні характеристики (поверхневі води, дані про основні водні об'єкти та ін.); характеристики тестових ділянок та їх елементів (координати, просторові розміри й однорідність, спектральні сигнатури та інші атрибути класів), які зведені у таблиці БД.

Виконання розглянутих вимог до паспорту полігону ДЗЗ є однією з найважливіших умов успішної їх імплементації в міжнародну мережу наземних засобів калібрування бортових аерокосмічних сенсорів і валідації дистанційних даних.

На території полігону виділено 25 тестових ділянок, які охоплюють основні класи земних покривів, що складають дану місцевість та є характерними для всього регіону Західного Полісся (додаток В).

В процесі досліджень було розроблено типову форму паспорта тестової ділянки полігону ДЗЗ (додаток Г). Протягом щорічних спостережень паспорт доповнюється даними нових спостережень, що відповідає вимогам виконання моніторингових досліджень. В паспорті подаються фотографії, які фіксують стан рослинності і зміни екологічних умов у межах ділянки.

Тематичні задачі, що вирішуються на Шацькому полігоні ДЗЗ, є дуже різноманітними. Це: калібрувально-завіркові роботи матеріалів космічних знімань; відпрацювання методики класифікації покривів за допомогою ДЗЗ; створення БД для спектральних сигнатур об’єктів ДЗЗ; моніторингові дослідження та визначення тенденцій розвитку досліджуваних біогеосистем в цілому та її окремих складових; періодичні наземні спостереження та спектрометрування РП з метою поповнення бази спектральних сигнатур; дослідження та прогнозування екологічного стану території з метою встановлення глобальних та регіональних тенденцій природних змін в літо-, гідро-, атмо- та біосфері та геомоніторинг вмісту вуглецю в атмосфері [13, 14].

При зборі інформації на полігонах та виконанні різних вимірів необхідно дотримуватись міжнародних та національних стандартів. У “Словнику з

дистанційного зондування Землі” [46] дано таке визначення полігону підсупутникових вимірювань: “Частина поверхні Землі з відомими географічними, геодезичними, спектральними та іншими характеристиками, яка може бути використана як джерело допоміжних даних при інтерпретуванні даних ДЗЗ”. Тематичний полігон ДЗЗ – визначена територія, що характеризує певні особливості регіону, включає типові для даної фізико-географічної зони ландшафтні умови, які можуть бути використані для завірково-калібрувальних робіт матеріалів ДЗЗ та вирішення тематичних завдань. Цей полігон включає основні типи земних покривів, що переважають в структурі регіону. В межах полігону вибираються ділянки і тестові елементи, на яких ведуться періодичні стандартизовані польові спостереження та фізичні виміри.

У зв’язку з тим, що в Україні існує мережа полігонів з тестовими ділянками різного призначення та технічного стану для наземної верифікації результатів дешифрування КЗ, виникає практична проблема оцінки й вибору відповідного складу полігонів і тестових ділянок, параметри яких найбільш відповідають заданим тематичним задачам і сформульованим вище вимогам. З найбільшою деталізацією представлено результати досліджень на прикладі Шацького полігону, де широко розповсюджені водно-болотні та лісові екосистеми Полісся (додаток Д) [13, 14, 47-64].

Основою для подальших досліджень має стати проведений огляд існуючих методів та технічних засобів для дистанційного геомоніторингу території України. Водночас проводиться аналіз чинних нормативних актів та запроваджується комплекс наземних досліджень, необхідних для визначення стану рослинності з використанням багатоспектральних (гіперспектральних) КЗ. Після вибору тестових полігонів проводиться розробка необхідних методів для геомоніторингу ГС. Для більш повноцінного та достовірного визначення необхідної інформації про стан ГС має враховуватися характер фенологічних та інших змін РП, що потрібує використання КЗ. Наступним кроком буде вибір тестових ділянок верифікації даних КГМ України із залученням даних наземних досліджень [13, 14].

Отже, результатом досліджень стануть як верифікація даних КГМ території України, що базується на використанні багатоспектральних (гіперспектральних) КЗ та наземних завіркових даних, так і оцінка стану довкілля та пошуки родовищ корисних копалин. Також буде розглянуто принципову можливість створення комплексної методики наземно-дистанційних пошуків родовищ корисних копалин при виборі однотипних рослинних угруповань у різних ландшафтно-кліматичних зонах України [13, 14].

Висновки до першого розділу

1. Проведено збір та аналіз різнопланової інформації про райони досліджень (КЗ, топографічні карти, дані кліматичних, агрономічних, лісотаксаційних, геолого-гідрологічних, гідрогеологічних та інших досліджень).

2. Виконано аналіз розташування полігонів ДЗЗ. Розглянуто типові тематичні задачі, що вирішуються, на прикладі Шацького полігону ДЗЗ.

3. Проведено забезпечення геоінформаційними та картографічними даними полігонних досліджень.

4. Розроблено типову форму паспорта тестової ділянки полігону ДЗЗ (додаток 3).

Список використаних джерел до першого розділу

1. Global Earth Observation System of Systems (GEOSS). 10-Year Implementation Plan: Reference Document. *Published by ESA Publication Division*. Noordwijk, The Netherlands, 2005. 210 p.

2. Barrett E.C. and Curtis L.F. Introduction to Environmental Remote Sensing. 4th ed. Taylor and Francis Group, 1999. 457 p.

3. McCoy R.M. Field Methods in Remote Sensing. New York: Guilford Press, 2004. 159 p.

4. Мовчан Я.И., Каневский В.А., Семичаевский В.Д. Фитоиндикация в дистанционных исследованиях. Киев: Наук. думка, 1993. 310 с.

5. Коротаев Г.К., Еремеев В.Н., Кубряков А.И. Глобальная океаническая наблюдательная система Черного моря: научная стратегия и дизайн. *Екологічна безпека прибережної та шельфової зон та комплексне використання ресурсів шельфу*. Севастополь: МГІ НАН України, 2003. Вип. 2 (7). С. 5-17.

6. Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі: Лялько В.І., Попов. М.О. (ред.). Київ: Наук. думка, 2006. 358 с.

7. ДСТУ 4758:2007. Дистанційне зондування Землі з космосу. Оброблення даних. Терміни та визначення понять. Київ: Держспоживстандарт України, 2007.

8. Anderson J.R., Hardy E.E., Roach J.T., Witmer R.E. Land Use and Land Cover Classification System for Use with Remote Sensor Data Geological Survey Professional Paper 964, US Government Printing Office. Washington, 1976. 41 p.

9. Büttner G., Feranec J., Jaffrain G. et, al. The CORINE Land Cover 2000 Project. *EARSeL Proceedings*. 2004. Vol. 3. P. 331-346.

10. http: las.physik.uni-oldenburg.de eProceedings vol03_3 contents.html

11. Попов М.А. Методология оценки точности классификации объектов на космических изображениях. *Проб. управления и информатики*. 2007. № 1. С. 97-103.

12. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. Москва: Наука, 1969. 576 с.

13. Изменение земных систем в Восточной Европе: Лялько В.И. (ред.). Киев: Фолиант, 2010. 582 с.

14. Earth Systems Change over Eastern Europe: Coeditors P., Lyalko V. (Eds.). Kiev: Akademperiodyka, 2012. 488 p. ISBN 978-966-360-195-3.

15. 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.

16. **Дугін С.С.** Оцінка і вибір полігонів для наземної завірки інформації космічного геомоніторингу. *Доп. НАН України*. 2014. № 5. С. 87-95.

17. Шпортюк З.М., Сибірцева О.М., **Дугін С.С.** Вплив просочування природного газу на наземних хлорофільний індекс та позицію червоного краю спектрів відбиття пшениці над газовим родовищем. *Доп. НАН України.* 2011. № 11. С. 115-119.

18. 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.

19. 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.

20. 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.

21. 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.

22. 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.

23. 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.

24. 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.

25. 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.

26. 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

27. 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.

28. Артюшенко М.В., **Дугін 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.

29. 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.

30. 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.

31. 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.

32. 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.

33. 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.

34. 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.

35. 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.

36. 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.

37. 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.

38. 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.

39. 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.

40. Шацький природний національний парк. www.shatsk.com

41. ДСТУ 2462-1994. Сертифікація. Основні поняття. Терміни та визначення. Київ: Держспоживстандарт, 1994.

42. ДСТУ 3413-1996. Порядок проведення сертифікації продукції. Система сертифікації УкрСЕПРО. Київ: Держспоживстандарт, 1996.

43. ДСТУ 4758-2007. Дистанційне зондування Землі з космосу. Оброблення даних. Терміни та визначення понять. Київ: Держспоживстандарт, 2007.

44. Попов М.О., Марков С.Ю., Кудашев Є.Б. Концептуальні підходи до побудови раціональної інформаційної інфраструктури організації, яка

опрацьовує дані ДЗЗ. Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. Львів: Вид-во нац. ун-ту “Львівська політехніка”, 2009. С. 231-237.

45. Попов М.О., Цимбал Т.В. Правила та процедура сертифікації методик використання даних дистанційного зондування Землі при вирішенні тематичних задач. *Косм. наука і технологія*. 2004. Т. 10, № 4. С. 104-112.

46. ДСТУ Б В.2.5-32:2007 Терміни та визначення понять. Київ, 2007.

47. Словник з дистанційного зондування Землі: Лялько В.І., Попов М.О. (ред.). Київ: СМП АВЕРС, 2004. 170 с.

48. Андриенко Т.Л. Болота украинского Полесья, охраняемые в национальных парках и заповедниках. *Растительность болот: соврем. пробл. классификации, картографирования, использования и охраны:* Материалы междунар. науч.-практ. семинара (Минск, 30 сент.-1 окт. 2009). Минск, 2009. С. 13-16.

49. Виноградов Б.В. Аэрокосмический мониторинг экосистем. Москва: Наука, 1984. 320 с.

50. Геоботанічне районування Української РСР: Андрієнко Т.Л., Білик Г.І., Брадіс Є.М. Київ: Наук. думка, 1977. 302 с.

51. Гидрогеологическая карта СССР. Сер. Волыно-Подольская. Лист М 35 11: Шестопалова Е.В., Настека З.Д., Шестопалов В.М. (сост.); Варава К.Н. (ред.). Киев: М-во СССР, 1974. 59 с.

52. Голубев А., Князев Н., Ерасова Л. Материалы маршрутной разведки торфяного месторождения “Локницкое” Дубровицкого района Ровенской области. Смоленск: Главгеология РСФСР, Смолен. геол.-развед. партия, 1964. 58 с. (Укр. террит. геол. фонды).

53. Копыстко В.Ф. Отчет о предварительной разведке торфяного месторождения “Неньковичское” Заречнянского района Ровенской области УССР. Киев: М-во СССР, Киев. геол.-развед. трест, Киев. геол. экспедиция, 1971. 125 с. (Укр. террит. геол. фонды).

54. Косенко Н.П., Антоненко А.В Отчет о детальной разведке торфяного месторождения “Коростянское” (Любешевский и Камень-Каширский районы

Волынской области УССР). Киев: М-во СССР, ПГО “Севукргеология” , 1984. 136 с. (Укр. террит. геол. фонды).

55. Карась В.И. Геолого-экономический обзор ресурсов торфа Волынской и Ровенской областей. Киев: М-во СССР, ПГО “Севукргеология”, 1988. Т. 1. 38 с. (Укр. террит. геол. фонды).

56. Карась В.И. Справочник по торфяным месторождениям Волынской области УССР. Киев: М-во СССР, ПГО “Севукргеология”, 1988.. Т. 2. 158 с. (Укр. террит. геол. фонды).

57. Леймунский А.С. Отчет о детальной разведке торфяного месторождения “Цырское” Камень-Каширского и Любешевского районов Волынской области УССР. Киев: М-во СССР, 1969. 100 с. (Укр. террит. геол. фонды).

58. Мале Полісся – проектований національний природний парк України (Хмельницька область): Андрієнко Т.Л. (ред.). Кам’янець-Подільський: ПП ”Мошинський”, 2007. 40 с.

59. Михальчук В.Б., Блощук Н.Н. Отчет о детальной разведке торфяного месторождения “Великое” (Припять, Любомильский район Волынской области УССР). Киев: М-во СССР, ГРЭ ПГО “Севукргеология”, 1985. 57 с. (Укр. террит. геол. фонды).

60. Національний атлас України. Київ: ДНВП “ Картографія ”, 2007. 440 с.

61. Проект організації території, охорони, відтворення та рекреаційного використання природних комплексів і об’єктів Шацького національного природного парку: Горун А.А., Матейчик В.І., Прядко О.І. Київ, 1999. 132 с.

62. Режим поверхностных вод СССР. Вып. 1, Украина и Молдавия. Ленинград. Гидрометеоиздат, 1969. 85 с.

63. Стойко С.М., Ященко П.Т., Жижин М.П. Шацький природний національний парк. Львів : Каменяр, 1986. 46 с.

64. Шевчук М.Й. Грунти Волинської області. Луцьк: Вежа, 1999. 162 с.

65. ASD FieldSpec3FR. User Manual ASD Document 600540 Rev. G. USA, 2007. 96 p.2

РОЗДІЛ 2

ОБГРУНТУВАННЯ ВИМОГ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ НА ТЕСТОВИХ ДІЛЯНКАХ ВЕРИФІКАЦІЇ ДАНИХ КОСМІЧНОГО ГЕОМОНІТОРИНГУ ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ

На території України розташовано близько 20 тисяч родовищ і 117 видів проявів корисних копалин. З них 8291 родовище і 97 видів проявів мають промислове значення і враховано Державним балансом запасів. За потенційною вартістю підтверджених видобутих запасів Україна посідає 12 місце в світі (2,2% потенційної вартості світових запасів) [1]. Тому залучення методів ДЗЗ для більш єфективного освоєння цих запасів корисних копалин є актуальним для вирішення економічних завдань.

Тенденції посилення антропогенного впливу на довкілля України вимагають розробки і впровадження оперативних методів оцінки і прогнозування цього впливу з метою його мінімізації. Саме цьому слугуватиме залучення методів ДЗЗ з їх верифікацією на відповідних тестових ділянках.

Таким чином, для ефективного та сталого розвитку економіки України сьогодні дуже актуальні проблеми, пов'язані з детальним вивченням і використанням мінерально-сировинної бази країни, стан якої залежить від своєчасного наповнення її запасами різних корисних копалин. Вирішення цих завдань залежить, в свою чергу, від рівня науково-дослідних розробок і застосування новітніх технологій пошуків корисних копалин. Це насамперед супутникові технології, ефективність всього комплексу геологорозвідувальних робіт (ГРР), під часу проведення яких використовуються матеріали космічних зйомок та виконується геомоніторинг ГС території України [2].

2.1. Методичні основи наземної верифікації космічної інформації ДЗЗ

В залежності від повноти та достовірності отриманих даних при пошуках корисних копалин розрізняють регіональне і локальне прогнозування. Регіональне прогнозування виявляє найбільш загальні закономірності розміщення родовищ корисних копалин, сприяє вибору раціональних напрямів

ГРР на перспективу. Прикладом такого регіонального прогнозу для території України може бути "Металогенічна карта України" [3].

Локальне прогнозування виконується по конкретних рудних районах, зонах, родовищах. Воно має на меті визначити умови утворення і закономірності розміщення конкретних родовищ і навіть рудних зон, покладів, тіл. У цьому аспекті дослідниками розробляється цілий ряд технологій з використанням як традиційних методичних підходів, так і нових, з урахуванням найсучасніших досліджень ГС.

Незважаючи на розвиток низки нових наукових підходів до пошуків родовищ корисних копалин, головним методичним інструментом виявлення і промислової оцінки родовищ на практиці були і залишаються ГРР. Вони проводяться комплексно з урахуванням геологічних особливостей, фізико-географічних і економічних умовах досліджуваних об'єктів (регіону, району, родовища). Весь процес вивчення геологічної будови території поділяється на етапи, що підрозділяються, у свою чергу, на стадії. На кожному етапі або стадії вирішуються свої певні геологічні завдання [4-7].

Перший етап – регіональна геологічна зйомка. На цьому етапі виділяються перспективні площі на пошуки корисних копалин, що становлять інтерес як об'єкти для більш детальних зйомок. Масштаби зйомок – від 1:500 000 до 1:25 000.

Другий етап – безпосередньо пошуки родовищ корисних копалин. Пошуки здійснюються з метою виявлення об'єктів, які потребують постановки розвідувальних робіт. Масштаби зйомок – 1:50 000-1:10 000.

Третій етап – розвідка родовищ корисних копалин. Метою розвідки родовища є виявлення промислових об'єктів корисних копалин і отримання даних, необхідних і достатніх для проектування та проведення експлуатаційних робіт [8-10].

Важливе значення при пошуках родовищ корисних копалин мають геохімічні методи пошуків [11-14]. Геохімічні роботи включають в себе широкий спектр різноманітних досліджень (літогеохімічні, фітогеохімічні,

біогеохімічні, геоботанічні, атмогеохімічні, гідрогеохімічні). В цілому, методи геохімічних досліджень передбачають встановлення і вивчення аномалій хімічних елементів-індикаторів геологічних структур, окремих тіл корисних копалин (як можливого зруденіння), що можуть концентруватися в атмосфері грунтів, тканинах рослинних угруповань, поверхневих і підземних водах. Кінцевим завданням геохімічних робіт є пошук і картування ділянок, перспективних для постановки більш детальних досліджень, та отримання матеріалів, достатніх для складання карт прогнозу корисних копалин з оцінкою прогнозних ресурсів.

Сучасні технології ДЗЗ дають можливість реєструвати інформацію не тільки в широкому діапазоні довжин хвиль електромагнітного спектра (від видимого до радіохвильового), але й фіксувати випромінювання в дуже вузьких спектральних інтервалах шириною 1-2 нм, при цьому кількість робочих спектральних каналів може досягати декількох сотень.

Дешифрування та інтерпретація отриманих таким чином матеріалів дистанційних зйомок дозволяють виявляти зв'язки між відбивними характеристиками поверхневих утворень і геологічними об'єктами. Зберігають своє значення методи аналізу морфологічних і ландшафтних особливостей поверхні Землі, що, як відомо, пов'язані з літологією геологічного субстрату, проявами тектонічної активності і глибинною будовою літосфери. Використання інформації, одержаної методами ДЗЗ, в поєднанні з наявною геолого-геофізичної інформацією, забезпечує досить високу ефективність пошуку найрізноманітніших корисних копалин [15-23].

Використання матеріалів ДЗЗ при геологічних дослідженнях можна поділити на два етапи: 1) використання результатів дешифрування матеріалів дистанційних зйомок як методу отримання додаткової, головним чином структурної інформації, при виконанні оглядових, регіональних і детальних геологічних досліджень різних видів звичайними наземними методами; 2) застосування спектрометричних вимірювань як самостійного способу розпізнавання та оконтурювання геологічних об'єктів.

Перший етап охоплює проведення оглядових, регіональних і детальних геологічних досліджень, заснованих на широкому використанні дистанційних методів на різних стадіях ГРР. Така система досліджень включає дистанційне геологічне картування, роботи з наземної перевірки результатів дешифрування, з геолого-мінерагенічного картування, з геологічного вивчення районів закладення свердловин.

Спільне використання результатів дешифрування дистанційної інформації та різних геолого-геофізичних матеріалів є одним з важливих прийомів геологічного картографування. Тенденція до комплексуванню різних матеріалів ДЗЗ і геолого-геофізичних даних закріплюється і підтримується наявністю комп'ютерних технологій обробки даних, побудови геопросторових моделей, візуалізації, а також широким використанням геоінформаційних систем (ГІС).

Геологічне дешифрування матеріалів ДЗЗ шляхом аналізу ландшафтних індикаторів, особливо рельєфу, отримало дуже велике поширення і стало основою для оформлення таких специфічних розділів регіональних геологічних досліджень, як складання космогеологічних карт і лінеаментний аналіз.

Накопичений досвід свідчить про можливість широкого використання матеріалів космічних зйомок для отримання нової геологічної інформації, поліпшення та оновлення геологічних карт, створення або вдосконалення регіональних структурних моделей і тектонічних концепцій. Особливо ефективне використання дистанційних матеріалів у структурних дослідженнях.

Зазначимо, що місце і роль дистанційних досліджень в процесі ГРР визначено в нашій країні нормативними документами Державної служби геології і надр [9, 10, 24, 25].

Напрям, на якому ми більш детально зупинилися у роботі, використання матеріалів ДЗЗ при геологічних дослідженнях орієнтовано на розпізнавання геологічних об'єктів шляхом вимірювання спектральних характеристик яскравості мінералів і гірських порід, рослинності, ґрунтів тощо у різних діапазонах електромагнітного спектра. Він активно розвивається в останнє

десятиліття. Особливе значення при цьому приділяється методам розпізнавання об'єктів, що асоціюються з конкретними копалинами або ідентифікують перспективні тектонічні структури.

Результати оптичних вимірювань в різних зонах електромагнітного спектра допомагають розпізнаванню за матеріалами багатоспектральних (гіперспектральних) КЗ різних геологічних об'єктів, що знаходяться на поверхні Землі, або об'єктів, які відображаються на різних глибинних зрізах земної кори. На цій підставі виникли і продовжують розвиватися різні методи прямого розпізнавання об'єктів геологічної зйомки і пошуків конкретних корисних копалин.

Використання оптико-спектрального підходу до розпізнавання і оконтурювання геологічних об'єктів вимагає знання спектральних характеристик рослинності і ґрунтового покриву. З цією метою в світі створюються спектральні банки і БД, в яких зосереджується і накопичується необхідна інформація про геологічні об'єкти, рослинність тощо. Для багатьох різновидів природних об'єктів добре визначені притаманні їм спектри, що дозволяє виявляти площі з цими об'єктами на аерокосмічних знімках. Варто зазначити, що оптико-спектральні характеристики рослинності дуже мінливі в залежності від сезону зйомки, висоти сонцестояння, температури, вологості і т.д., що ускладнює розпізнавання їх на знімках.

Накопичено певний досвід цільового використання матеріалів аерокосмічних зйомок при прогнозно-оціночних геологічних роботах для пошуків рудних і нерудних корисних копалин. Аналіз і узагальнення цього досвіду, як на території України, так і в інших регіонах світу, дозволяє окреслити наступні тенденції розвитку дистанційних методів, призначених для цих цілей: 1) розробка питань металогенічного аналізу, прогнозування та пошуків шляхом виявлення і картування різних структурних елементів (лінеаментів, кільцевих структур, їх поєднань тощо) [17, 19, 26-29]; 2) пряме розпізнавання рудоносних порід, а також геохімічних аномалій шляхом спектрометричних вимірювань [30-32].

У дисертаційній роботі більш детально розглянуто другий напрям.

Використання даних ДЗЗ спочатку базувалося в основному на геоіндикаційній концепції про взаємозв'язок усіх компонентів ландшафту, який є результатом взаємодії ендогенних і екзогенних процесів та містить інформацію про структуру, склад і стан глибинних геологічних об'єктів у якості їх геоіндикаторів [33-35].

Дослідження на основі матеріалів аерокосмічних зйомок проведено на ряді вивчених геолого-геофізичними методами територіях, де визначалися геоморфологічні, геологічні та ландшафтні оптичні поля похованих локальних пасток різного типу. В результаті їх аналізу і вивчення виділялися нові аномальні ділянки, імовірно, обумовлені локальними пастками ВВ. Найбільш ефективним результатом в цьому випадку було комплексування результатів вивчення КЗ, геолого-геофізичних і геохімічних даних [36, 37].

Поява останнім часом космічних апаратів (КА) ДЗЗ з бортовими засобами зйомки з високим просторовим і спектральним розрізненням, нових комп'ютерних технологій їх обробки із впровадженням ГІС-технологій виводить аерокосмічні методи на якісно новий рівень. Це спостерігається як при вивченні регіональних закономірностей, так і при локальному і детальному прогнозі нафтогазоносності. Нині активно розвивається використання багатоспектральних і гіперспектральних космічних даних з високим спектральним діапазоном [38-41].

Останнім часом у Науковому центрі аерокосмічних досліджень Землі (ЦАКДЗ) ІГН НАН України успішно розвиваються дослідницькі роботи по застосуванню спектральних характеристик у видимому і ближньому інфрачервоному (БІЧ) діапазонах для цілей нафтогазопошукових робіт [42-51]. Розроблено методики пошуку нафтогазових покладів, що базуються на аналізі спектральних характеристик. Методики, які успішно використовуються на ряді підприємств нафтогазовидобування України та країн далекого і ближнього зарубіжжя, показали її високу ефективність (до 70-85%, за О.І. Архиповим).

При ГРР і пошуках корисних копалин дані дистанційних зйомок розглядаються, як правило, як джерело нетрадиційної нової інформації, яка не може бути отримана іншими методами. Характер цієї інформації залежить насамперед від таких параметрів, як розрізнювальна здатність (просторова і спектральна), а також від спектрального діапазону зйомки. Залежно від розв'язуваної геологічної задачі висуваються і конкретні вимоги до виду та якості дистанційних матеріалів; при цьому визначальним фактором при виборі тих чи інших космічних даних слугує масштаб досліджень. Так, під час геологічного картування (геологічна зйомка) досить мати матеріали багатоспектральної зйомки у видимому і ближньому інфрачервоному діапазонах (зазвичай 3-4 спектральних канали + панхром). Для виявлення та картування глибинних розривних порушень і пов'язаних з ними рудних зон перевага надається космічним матеріалам, на яких реєструється, власне випромінюється теплове поле Землі (*Landsat, ASTER* і т.д.).

При вирішенні завдань пошуку скупчень конкретних корисних копалин емпірично встановлюються спектральні залежності по лінії «пошуковий об'єкт-ландшафт-знімок» і вибираються вузькі діапазони зйомки та їх комбінації як у видимому, так і в ближньому інфрачервоному і тепловому діапазонах. Для цих цілей використовуються матеріали багато- і гіперспектральних космічних зйомок з кількістю спектральних каналів від 8-10 до 220 при виконанні геолого-пошукових досліджень з метою прогнозування ГРР і створення на їх основі розширених БД [52].

Таким чином, з огляду на надзвичайно велику різноманітність геологічних завдань, при вирішенні яких використовуються космічні дані, сформулювати єдині вимоги до видів космічної зйомки досить складно. Це залежить від роздільної (просторової, спектральної і радіометричної) здатності і визначається масштабом геологічних і пошуково-геологічних досліджень.

Головним критерієм, що визначає набір космічних матеріалів для певного масштабу досліджень, є картографічне поняття "граничної графічної точності карти", яка на практиці дорівнює відстані на місцевості, що відповідає 0,2 мм

на карті того чи іншого масштабу.

Разом з тим космічні дані, отримані з КА, можуть з успіхом застосовуватися для вирішення ГРР як регіонального, так і локального рівнів [52].

2.2. Аналіз інформативних ознак досліджуваних природних процесів і об'єктів для задач природокористування на основі космічних зйомок

Дешифрування матеріалів аерокосмічних зйомок шляхом аналізу ландшафтних індикаторів залучає різні методи прямого розпізнавання об'єктів геологічної зйомки і пошуків конкретних корисних копалин.

Рослина являє собою фізичний об’єкт, який, при освітленні його сонячним випромінюванням, частково відбиває його, частково поглинає і частково пропускає. Якщо беруться до уваги інтегральні (по всьому спектру) характеристики випромінювання, то оптичні властивості рослини характеризуються коефіцієнтом відбиття ρ, коефіцієнтом поглинання α та коефіцієнтом пропускання τ. Якщо розглядається випромінювання на якій-небудь фіксованій довжині хвилі λ, то користуються спектральними коефіцієнтами ρ_λ, α_λ та τ_λ.

У ряді випадків замість спектрального коефіцієнта відбиття ρ_λ використовують коефіцієнт спектральної яскравості (КСЯ).

Вплив різних факторів на довкілля супроводжується у РП перерозподілом енергії між відбитою, поглиненою та пропущеною складовими випромінювання. При аерокосмічному зніманні реєструється амплітуда (інтенсивність) відбитого випромінювання.

Основним органом, який сприймає радіацію, є листок, і від його оптичних властивостей у значній мірі залежить забезпеченість енергією рослини та функціонування РП. Основні закономірності спектрального відгуку листка в цілому справедливі і для рослинних об’єктів більш високого рівня організації: окремої рослини, рослинних угруповань, РП. Основні особливості відгуку РП будуть розглянуті нижче.

Спектральна область поглинання променистої енергії листком простягається від УФ- до ІЧ-інтервалу. УФ-випромінювання з довжинами хвиль 240-380 нм практично цілком поглинається клітинними оболонками, ферментами і різними пігментами. ІЧ-випромінювання поглинається водою, що міститься в тканинах листка, і цитоплазмою.

Форма спектрів поглинання та відбиття рослин у видимій області спектра задається вихідними електронними переходами в молекулах пігментів рослин [53, 54].

Основними рослинними пігментами, що беруть участь у формуванні спектральних характеристик рослин, є хлорофіли, які обумовлюють зелене забарвлення, і споріднені з ними сполуки порфіринової групи (фітохром, фікобіліни), а також каротиноїди, антоціани, флавоноїди. Функціональна класифікація рослинних пігментів та оптичних властивостей рослин наведена у роботах [53, 55].

Треба зазначити, що у природі фактори навколишнього середовища не діють ізольовано, а виключно у комплексі з усіма іншими факторами і внутрішнім середовищем рослини. Визначальним є чинник, значення якого найбільше відхиляються від оптимальних для даного виду. Впливи деяких фізичних, хімічних і біологічних факторів та їх унікальних комбінацій взагалі можуть бути вивчені тільки в природних умовах [56 - 59].

Фактори навколишнього середовища діють одночасно і разом, посилюючи або послаблюючи один одного. Дія кожного окремого фактора в значній мірі залежить від екологічного фону, тобто від кількісного вираження інших факторів. Тому у природі рослини, як правило, більш чутливі до впливу будь-якого окремого фактора, оскільки в лабораторних умовах останні фактори більш-менш збалансовані.

Спектральна відбивна крива, інтегральна відбивна здатність вища у молодих рослин і нижча в повністю зрілих. Наприкінці періоду вегетації спостерігається підвищення відбиття у видимому діапазоні, пов’язане з руйнацією пігментів, і зниження відбиття в ІЧ-діапазоні, певно, обумовлене

накопиченням сухої речовини, зниженням вмісту води і деструктуризацією тканин. В умовах, що наближаються до оптимальних, рослини характеризуються меншими коефіцієнтами відбиття і більш чітким максимумом у зеленій зоні спектра в порівнянні з рослинами, що знаходяться в гірших умовах. Зниження відбиття в БІЧ-діапазоні спостерігається при захворюваннях, тобто імітує процес старіння [60 - 65].

Життя і відбивні властивості РП середніх широт характеризуються чітко вираженою сезонністю. Сезонні зміни РП можуть істотно вплинути на результати його дистанційних досліджень, оскільки на різних стадіях вегетації залежність відбивної здатності РП в окремих діапазонах від біометричних параметрів (біомаси, індексу листової поверхні тощо) змінюється. Так, спектр відбиття рослини на початку вегетації (і РП у цілому) помітно відрізняється від його відгуку в період цвітіння (у випадку РП, наприклад, це луг або степ, або сільськогосподарська монокультура), коли в картину відбиття роблять істотний внесок пігменти, які обумовлюють колір квіток (антоціани, флавоноїди). При цьому звичайно відбувається селективне зростання КСЯ, що може призвести до зникнення мінімумів у смугах поглинання пігментів, а також і до зміщення максимуму КСЯ із зеленого діапазону у той чи інший бік БІЧ-діапазону. Зміни КСЯ РП в окремих зонах, наприклад, при довжині хвилі 660 нм може сягнути 2 разів. Найбільший вплив квітів на КСЯ РП реєструється в тому випадку, коли вони знаходяться у верхніх шарах РП (соняшник, пижмо, гречка, в’юнок). У протилежному випадку (бавовна, томати, огірки) внесок квітів у КСЯ РП не є значним. У БІЧ-діапазоні квітки за своїми спектральними характеристиками не виділяються серед інших елементів, тому вони слабо впливають на КСЯ РП. У зв’язку з цвітінням різко знижується взаємозв’язок між індексами листової поверхні і надземної біомаси, у результаті чого точність оцінки надземної фітомаси за даними ДЗЗ у видимому і БІЧ-діапазонах на пізніх етапах вегетації зменшується [66].

Контрасти в сезонному розцвічуванні листя використовуються для вирішення задач розпізнавання окремих типів РП [67-70]. Оптимальними

термінами проведення дистанційних досліджень з метою розпізнавання типів РП за їх відбивною здатністю вважаються такі, коли розходження типів РП максимальні: наприклад, для хвойних і листяних лісів це початок і кінець активної вегетації (весна та осінь). Це ж явище можна використовувати і для виявлення ділянок РП, що знаходяться під посиленим впливом факторів навколишнього середовища.

У випадку, коли РП не є оптично щільним, на його спектральні характеристики впливають спектральні характеристики ґрунтів. Кількість рослин на одиницю площі характеризується коефіцієнтом проективного покриття μ, біомасою (зеленою, сухою тощо) або тісно пов'язаним із нею листковим індексом LAI (Leaf Area Index) та вмістом хлорофілу [61].

Залежність величини КСЯ системи «ґрунт-рослина» від сирої біомаси наведена в [61]. Показано, що у смузі поглинання хлорофілу у червоному діапазоні, де рослинність темніша за ґрунт, КСЯ знижується із збільшенням щільності рослинності, а у діапазоні 800-1100 нм, де рослинність є яскравішою за ґрунт, зростає.

Формула узгоджується з моделями РП у вигляді мутного середовища. Аналогічна експоненціальна залежність між КСЯ та листовим індексом LAI наведена у [69].

Так, для геомоніторингу фенологічних, сезонних та багаторічних змін стану дерев'янистої та трав'янистої рослинності найчастіше використовують вегетаційний нормалізовано-різницевий індекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index).

Треба підкреслити, що значення NDVI залежать від сумарної температури території, що вивчається [72], від типу ґрунту [73]. Щоб усунути небажані зміни значень NDVI, зумовлених дією інших факторів (анізотропії земної поверхні, хмарності, атмосферних шумів тощо), пропонуються різні методи, зокрема, статистичний аналіз часових серій NDVI [72], або застосування прихованих марковських моделей випадкових процесів для часових рядів даних NDVI [73].

Вивчення спектральних відбивних властивостей рослин і рослинних угруповань слугує основою дистанційних методів оцінки стану РП для розв'язання різноманітних прикладних задач: оцінювання стану і прогнозу врожайності сільськогосподарських культур, картування лісових масивів, виявлення лісових пожеж, вивчення ушкодження рослинності різними хворобами й шкідниками тощо.

Максимальна інформативність досліджень може бути досягнута при використанні КСЯ й альбедо для трьох–п'яти довжин хвиль: найбільшою мірою криві відбиття розбігаються в діапазонах 550-660, 660-680 і 800-890 нм та при використанні комбінацій окремих спектральних параметрів (вегетаційних індексів). Додаткова інформація про тип листків і вміст у них вологи, а також про вологість ґрунтів може бути отримана в тепловому діапазоні. [73].

2.3. Апаратура наземних досліджень: 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; польовий спектрорадіометр ASD FieldSpec3FR

Розглянуто обладнання для наземної верифікації даних ДЗЗ. Зокрема, система реєстрації змін CO_2 на основі газометричної апаратури Qubit Systems 150 забезпечує вимірювання вмісту парникових газів, температури, вологості, освітленості в атмосфері будь-якої ділянки, району, регіону. Унікальною перевагою аналізатора є можливість визначення рівня вмісту в атмосфері парникових газів з високою точністю, що забезпечує сучасні вимоги як наукових досліджень, так і практичних задач.

Аналіз міжнародного ринку аналізаторів парникових газів свідчить про те, що він є досить насиченим і різноманітним. Вирішенням проблеми дослідження парникових газів займаються як відомі провідні державні, так і

комерційні організації (компанії) світу, зокрема в США, Німеччині. Разом з тим ринок насичений широко рекламованими маловідомими компаніями, серед який значне місце посідають китайські виробники.

Ринок пропонує вимірювання рівня газів в атмосфері переважно з окремих компонентів, зокрема таких, як вуглекислий газ. Порівняння технічних характеристик аналізаторів за такими основними базовими критеріями, як бренд компанії, принцип дії аналізатора, точність вимірювань приладу, широта робочого діапазону, функціональні можливості обладнання та його вартість, експлуатаційні гарантії, дає можливість нам надати перевагу обладнанню американської компанії *Qubit Systems* і, зокрема, аналізатора *Qubit Systems 150*. Компанія є відомим світовим лідером у розробці передових технологій саме приладів для вимірювання парникових газів. Даний аналізатор цілеспрямовано, конструктивно має призначення для вимірювання саме парникових газів CO_2. Вимірювання здійснюється в реальному масштабі часу, що є важливим для коректності спостережень. Діапазон вимірювань надзвичайно широкий, а їх висока точність може забезпечувати сучасні вимоги як наукових досліджень, так і слугувати розв’язанню практичних державних задач у поєднанні із даними супутникових спостережень з геомоніторингу досліджень стану та рівнів парникових газів над територією України. Прилад може в подальшому нарощувати свої технологічні можливості при підключенні відповідних модулів. Таким чином, аналізатор *Qubit Systems 150*, що пропонується цією компанією, найбільшою мірою відповідає вище зазначеним критеріям.

Крім того, розглянуто систему дистанційної реєстрації мінливості спектрометричних параметрів земної поверхні DJI STS-VIS, що змонтована на базі квадракоптера. Час роботи – приблизно 15-20 хв. На борту квадрокоптера встановлено спектрометр Ocean Optics *STS-VIS* з робочим діапазоном 350-800 нм.

Для оцінки достовірності і точності інтерпретації даних ДЗЗ необхідна наявність наземної еталонної інформації БД про спектральні характеристики, фізичні і хімічні властивості, просторове розміщення еталонних об’єктів та ін.

Отримання такої інформації можливо за допомогою лабораторних і польових спостережень та вимірювань на спеціальних тестових ділянках (полігонах) спектрорадіометром FieldSpec3FR виробництва компанії “Analytical Spectral Devices, Inc.” (США). Діапазон вимірювання – 350-2500 нм. Існує багато вимог до виконання польових спектральних вимірювань.

Наприклад, спектри відбиття наземних об’єктів, отримані в полі з використанням сонячного випромінювання, у шкалі, яка подібна до шкали дистанційної системи формування багатоспектрального або гіперспектрального зображення, можуть використовуватися для перетворення спектральних характеристик пікселів зображення в спектральні відбивні характеристики відповідної ділянки земної поверхні.

Польова спектрометрія використовується також як інструмент аналізу для прийняття рішення про те, чи можливо і яким чином виявити за допомогою методів ДДЗ певний процес або об’єкт (речовину), що становлять інтерес для дослідження. Вимірювання спектральних характеристик природних та штучних об’єктів у польових умовах більш доцільне, ніж збір зразків для подальшого лабораторного аналізу. За допомогою високоточної польової спектрометричної апаратури розв’язуються задачі розвитку методів дослідження ДЗЗ, оцінювання економічної доцільності використовування ДЗЗ в даному дослідженні, геологічного картування та ін., а також калібрування спектрометричних систем, що встановлюються на супутниках.

ЦАКДЗ ІГН НАН України досить давно і плідно виконує роботи по використанню і розвитку методів дослідження стану природних ресурсів Землі і навколишнього середовища за допомогою методів ДЗЗ. Деякі дослідження, виконані на основі системного підходу до космічного геомоніторингу (методи, апаратура, метрологія, алгоритми обробки даних), досягли рівня технологій. Зокрема, створено технології пошуку ВВ на суходолі і шельфі, що були успішно застосовані як в Україні, так і за кордоном. Розроблено технологію оцінки видового стану лісів, що була застосована вченими ЦАКДЗ ІГН НАН України разом з фахівцями з Данії, Чехії і Бєларусі в рамках міжнародного

проекту “Technology for Automated Land Cover Classification”. Ці технології застосовують, поряд з іншими методами дослідження, метод, заснований на аналізі даних, отриманих за допомогою вимірювання спектральних характеристик об’єктів досліджень за матеріалами ДЗЗ (метод дистанційної спектрометрії). Оцінювання достовірності та якості вирішуваних завдань виконується в процесі проведення наземних досліджень на еталонних ділянках та аналізу апріорної геологічної біохімічної та іншої інформації. Наземні дослідження обов’язково передбачають вимірювання спектральних характеристик досліджуваних об’єктів. Обладнання для визначення температурних показників TemPro-1200, TROTEC TP-10 та тепловізор FLUKE Ti110 дозволяє проводити верифікацію даних температури навколишнього середовища та вимірювальних об’єктів для верифікації КГМ території України [74, 75].

Висновки до другого розділу

1. Головним критерієм, що визначає набір космічних матеріалів для певного масштабу досліджень, є картографічне поняття "граничної графічної точності карти", яка на практиці дорівнює відстані на місцевості, що відповідає 0,2 мм на карті того чи іншого масштабу.
2. Вивчення спектральних відбивних властивостей рослин і рослинних угруповань слугує основою дистанційних методів оцінки стану РП для розв’язання різноманітних прикладних задач: пошуку корисних копалин, оцінювання стану і прогнозу врожайності сільськогосподарських культур, картування лісових масивів, виявлення лісових пожеж, вивчення ушкодження рослинності різними хворобами й шкідниками тощо.
3. Наземні дослідження обов’язково передбачають вимірювання спектральних характеристик досліджуваних об’єктів за допомогою прецизійної апаратури.

Список використаних джерел до другого розділу

1. Реструктуризація мінерально-сировинної бази України та її інформаційне забезпечення. Київ: Наук. думка, 2007. 347 с.

2. Спутниковые методы поиска полезных ископаемых: Лялько В.И., Попов М.А. (ред.). Киев: Карбон-Лтд., 2012. 436 с.

3. Металогенічна карта України: Колосовська В.А., Веліканов В.Я., Войновський А.С., Волик А.П., Демєхін Л.О., Гурський Д.С. (ред.). Київ, 2007.

4. Положение о порядке проведения геологоразведочных работ по этапам и стадиям. М-во природ. ресурсов РФ. Москва, 1999.

5. Аристов В.В. Поиски твердых полезных ископаемых. Москва: Недра, 1975. 253 с.

6. Каждан А.Б. Поиски и разведка месторождений полезных ископаемых. Научные основы поисков и разведки месторождений. Москва: Недра, 1984. 285 с.

7. Каждан А.Б. Поиски и разведка месторождений полезных ископаемых. Москва: Недра, 1985. 288 с.

8. Гурвич И.И., Боганик Г.Н. Сейсмическая разведка. 3 изд. Москва: Недра, 1980. 551 с.

9. Організація та проведення геологічного довивчення раніше закартованих площ масштабу 1:200 000, складання та підготовка до видання Державної геологічної карти України масштабу 1:200 000. Інструкція. Київ: Геол. ком. України, 1999. 295 с.

10. Організація та проведення геологозйомочних робіт і складання та підготовка до видання Геологічної карти України масштабу 1:50 000 (1:25 000). Інструкція. Київ: Департамент геології та використання надр М-ва екології та природ. ресурсів України, 2002. 204 с.

11. Соловов А.П. Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых. Москва: Недра, 1985. 294 с.

12. Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений. М-во геологии СССР. Москва: Недра, 1983. 192 с.

13. Геохимические методы поисков нефтяных и газовых месторождений: Барташевич О.В., Зорькин Л.М., Зубайраева С.Л. и др. (ред.). Москва: Недра, 1980. 300 с.

14. Временные методические указания по составлению геолого-геохимических карт масштаба 1:50 000 (применительно к условиям Украинского щита). Киев, 1980. 52 с.

15. Аэрокосмические методы геологических исследований: Перцова А.В. (ред.). Санкт-Петербург: Изд-во С.-Пб. Картогр. ф-ки ВСЕГЕИ, 2000. 316 с.

16. Трофимов Д.М., Богословский В.А., Ильина Е.Б. Аэрокосмические и геолого-геофизические исследования закрытых платформенных территорий. Москва: Недра, 1986. 238 с.

17. Металлогенические и тектономагматические исследования на основе материалов аэрокосмосъемок. М-во геологии СССР, ВНИИ космоаэрогеол. методов, ПГО “Аэрогеология”. Ленинград: Недра, 1988. 212 с.

18. Аксенов А.А., Гридин В.И. Проблемы комплексного выполнения аэрокосмических, геолого-геофизических и геохимических исследований при нефтепоисковых работах. *Исслед. Земли из космоса*. 1990. № 5. С. 29-33.

19. Принципы и методика дистанционных исследований при прогнозировании твердых полезных ископаемых: Сб. науч. тр. Санкт-Петербург: ВНИИ геологии им. А.П. Карпинского, 1992. 144 с.

20. Временные методические рекомендации по применению материалов космической съемки при геологическом изучении платформенной части УССР: Николаенко Б.А., Веремеев П.С., Кубышкина Л.К., Пазинич Н.В. Киев: М-во геологии УССР, ЦТЭ, 1983. 77 с.

21. Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування: Лялько В.І., Попов М.О. (ред.). Київ: Наук. думка, 2006. 360 с.

22. Лялько В.І. Стан і перспективи розвитку аерокосмічних досліджень Землі в Україні. *Косм. наука і технологія*. 2002. Т. 8, № 2/3. С. 29-35.

23. Мичак А.Г., Філіпович В.Є., Тарангул О.Д. та ін. Сучасний стан та перспективи космогеологічних досліджень в Україні. *Сучасний стан і задачі розвитку регіональних геологічних досліджень*: Матеріали 3-ї наук.-практ. наради геологів-зйомщиків України (Рівне, 8-12 верес. 2005). Київ: УДГРІ, 2005. С. 187-189.

24. Геологічне картування. Дистанційна основа геологічних карт масштабу 1:200 000. Вимоги до складу матеріалів та порядку інтерпретації: А.Г. Мичак, В.Є. Філіпович, О.О. Янцевич, В.С. Готинян. Київ: Держ. геол. служба України, УкрДГРІ, 2010.

25. Мичак А.Г., Філіпович В.Є., Приходько В.Л. та ін. Аерокосмічні дослідження геологічного середовища. Київ: Держ. геол. служба України, ПДРГП "Північгеологія", 2010. 246 с.

26. Космическая информация в геологии: Трифонов В.Г., Макаров В.И., Сафонов Ю.Т., Флоренский П.В. (отв. ред.). Москва: Наука, 1983. 536 с.

27. Быстревская С.С. Основные структурные элементы докембрия и некоторые аспекты металлогении среднего Приднепровья (по аэрокосмическим и геолого-геофизическим материалам). Киев, 1988. 54 с. (Препр. / АН УССР. Ин-т геохимии и физики минералов).

28. Быстревская С.С. Структурная позиция железорудных формаций докембрия Большого Кривого Рога и КМА по дистанционным данным. *Железисто-кремнистые формации докембрия европейской части СССР: Тектоника.* Киев: Наук. думка, 1988. С. 47-56.

29. Быстревская С.С., Земсков Г.А., Семенюк Н.П. Применение материалов аэрокосмических съемок для изучения структуры и металлогении Украинского щита. Киев, 1981. 48 с. (Препр. / АН УССР. Ин-т геохимии и физики минералов).

30. Кочубей С.М., Каракис К.Д., Лялько В.И. Влияние тяжелых металлов на оптические характеристики листьев растений. *Физиология и биохимия культ. растений.* 1984. Т. 16, № 3. С. 248-251.

31. Філіпович В.Є., Приходько В.Л., Тарангул Д.О. Особливості комплексування дистанційних та традиційних геологічних методів при пошуках кольорових металів. *Косм. наука і технологія*. 2002. Т. 8, № 2/3. С. 170-173.

32. Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі: Лялько В.І., Попов. М.О. (ред.). Київ: Наук. думка, 2006. 358 с.

33. Готынян В.С. Прямая и обратная задачи геоиндикационных исследований нефтегазоносных территорий. *Аэрокосмогеологические исследования в комплексном решении нефтегеологических задач (опыт, эффективность, проблемы): Сб. науч. тр*. Москва: ИГиРГИ, 1992. С. 21-31.

34. Філіпович В.Є., Тарангул Д.О. Ландшафтно-геоіндикаційні та атмогеохімічні дослідження при вивченні нафтогазоносних структур Дніпровсько-Донецької западини. *Вісн. Київ. ун-ту. Сер. Географія*. 1997. Вип. 42. С. 47-53.

35. Можаев Б.Н., Афанасьев Н.Ф., Астахов В.И. Геоиндикационное моделирование (с использованием материалов аэрокосмических съемок). Ленинград: Недра, 1984. 247 с.

36. Металіді В.С., Філіпович В.Є. Застосування атмогеохімічних методів (газортутна зйомка) у комплексі нафтогазопошукових робіт. *Мінер. ресурси України.* 1996. № 4. С. 36-37.

37. Філіпович В.Є. Застосування аерокосмогеологічних та газортутних досліджень при нафтогазопошукових роботах. *Теоретичні та прикладні проблеми нафтогазової геології та геофізики*: у 2 т. Київ, 2000. Т. 2. С. 91-97.

38. Архипов А.И., Лялько В.И., Товстюк З.М. и др. Методические принципы поиска залежей углеводородов на суше с использованием аэрокосмической информации. *Косм. наука і технолог*ія. 2008. Т. 14, № 2/3. С. 55-60.

39. Архипов А.И., Товстюк З.М., Воробьев А.И. Методология и опыт поиска залежей углеводородов на суше и шельфе с использованием аэрокосмической информации. *Космическая съемка - на пике высоких технологий*: Материалы междунар. конф. (Москва, 18-20 апр. 2007). Москва, 2007. С. 23-25.

40. Архипов А.И., Козлов З.В., Лукин А.Е. Системные методы моделирования и прогноза залежей углеводородов на основе комплексного использования космической информации ДЗЗ и наземных наблюдений. *Геоінформатика*. 2007. № 2. С. 78-82.

41. Азімов О.Т. Оперативне прогнозування нафтогазових пасток неантиклінального та комбінованого типів за результатами аерокосмогеологічних досліджень. *Зб. наук. пр. ІГН НАН України*. Київ, 2009. Вип. 2. С. 13-19.

42. Мультиспектральний структурно-польовий спосіб прогнозування покладів нафти і газу: пат. № 63073А Україна. МПКG01V900, G01S1700. Перерва В.М., Тепляков М.А., Архипов О.І., Гонтаренко О.В., Бусел Г.Ф., Левчик О.І., Оскан'ян Т.В.; заявл. а2002097173 від 03.09.2002; опубл. 15.01.2004, Бюл. № 1.

43. Перерва В.М., Архипов А.И., Левчик Е.И. Аэрокосмические исследования в решении нефтегазогеологической супер-задачи – прямом поиске залежей углеводородов. *Науч. тр. Нац. горн. акад*. Днепропетровск, 1999. Т. 2, № 7. С. 67-71.

44. Архипов А.И., Перерва В.М., Левчик Е.И. Оптичні аномалії рослинності як індикатор покладів вуглеводнів. *Теоретичні та прикладні проблеми нафтогазової геології*. Київ, 2000. С. 52-57.

45. Федоровский А.Д., Якимчук В.Г., Архипов А.И. Прогнозирование и поиск месторождений нефти и газа на основе спектрофотометрирования растительного покрова. *Геоінформатика*. 2010. № 3. С. 44-47.

46. Попов М.О., Станкевич С.А., Титаренко О.В., Архипов О.І. Валідація результатів картування контурів покладів вуглеводнів за матеріалами наземного спектрометрування, дистанційними та геолого-геофізичними даними. *Мат. моделі і методи оптимізації інновацій та інформаційно-телекомунікаційно-мониторингові технології в задачах підвищення ефективності соціоеколого-економічних систем*: Тези доп. II Міжнар. наук.-практ. конф. (Київ, 12-15 жовт. 2010). Київ, 2010. С. 158-160.

47. Ковальчук С.П. Лінійна апроксимація контуру можливих границь покладу вуглеводнів на основі тонких спектральних градієнтів. *Мат. моделі і методи оптимізації інновацій та інформаційно-телекомунікаціно-моніторингові технології в задачах підвищення ефективності соціоеколого-економічних систем:* Тези доп. II Міжнар. наук.- практ. конф: (Київ, 12-15 жовт. 2010). Київ, 2010. С. 78-80.

48. Станкевич С.А., Титаренко О.В., Архипов А.І. Виявлення спектральних аномалій рослинності над покладами вуглеводнів. *Сучас. Інформац.технології управління екологіч. безпекою, природокористуванням, заходами в надзв. ситуаціях*: Зб. наук. пр. 1Х Міжнар. наук.-практ. конф. (Рибаче, 2010). Київ, 2010. С. 89-96.

49. Титаренко О.В. Методика уточнення контуру покладу вуглеводнів за дистанційними, геолого-геофізичними даними та даними наземного спектрометрування рослинності. *Екологія і ресурси*. 2010. № 4. С. 49-56.

50. Архипов А.И., Козлов З.В., Лукин А.Е. Системные методы моделирования и прогноза залежей углеводородов на основе комплексного использования космической информации дистанционного зондирования Земли и наземных наблюдений. *Геоінформатика*. 2007. №2. С. 78-82.

51. Азімов О.Т. Застосування комп'ютеризованих дистанційних технологій при вивченні систем розломів земної кори Північного борту Дніпровсько-Донецької западини (у зв'язку з нафтогазоносністю). *Можливості сучас. ГІС-технологій ДЗЗ у сприянні вирішення пробл. Слобожан. регіону:* Матеріали регіон. наради (14-16 черв. 2005, м. Суми). Суми: ДНВЦ "Природа" НКА та Держкомприродресурсів України, 2005. С. 48-51.

52. Гуд В.В., Красавцев В.М., Панков Э.Д. Обобщенный анализ адекватности моделей оптико-физических явлений в природных и антропогенных объектах и информационных оптико-электронных системах спектрозонального мониторинга. Актуальные проблемы современных оптико-информационных систем и технологий. *Науч.-техн. вестн. С.-Пб. ун-та.* 2004. Вып. 16. С. 35-43.

53. Гудвин Т., Мерсер Э. Введение в биохимию растений. Москва: Мир, 1986. Т. 1. С. 71-108.

54. Бриттон Г. Биохимия природных пигментов. Москва: Мир, 1986. С. 422.

55. Михайлов А.В., Саблина И.Ю. Миграция углеводородов и возможности установления отражения их ареалов в ландшафте аэрокосмическими методами. Прогнозирование структур осадочного чехла на основе комплексной интерпретации и обработки на ЭВМ аэрокосмических и геолого-геофизических данных. Москва, 1990. С. 21-33.

56. Кронберг П. Дистанционное изучение Земли. Основы и методы дистанционных исследований в геологии. Москва: Мир, 1988. 349 с.

57. Горышина Т.К. Экология растений. Москва: Высшая шк., 1979. 368 с.

58. Силаева А.М. Структура хлоропластов и факторы среды. Киев: Наук. думка, 1978. 202 с.

59. Дистанционное зондирование: количественный подход: Свейн Ф., Дейвис Ш. (ред.). Москва: Мир, 1983. 415 с.

60. Жуков Б.С. Физические основы дистанционного зондирования. *Итоги науки и техники. Сер. Исслед. Земли из космоса*. 1987. № 1. С. 6-78.

61. Ефременко В.В., Мошков А.В., Семенов А.А. Метод выявления угнетенной растительности по данным спектрозонального сканера. *Исслед. Земли из космоса*. 1997. № 6. С. 3-9.

62. Щадчина Т.М. Наукові основи дистанційного моніторингу стану посівів зернових. Київ: ІФРГ НАН України, Укр. фітосоціол. центр, 2001. 220 с.

63. Обиралов А.И. Дешифрирование снимков для целей сельского хозяйства. Москва: Недра, 1982. 145 с.

64. Василевская В.К., Антонова И.С. К вопросу о пластичности строения листа. *Вопросы экологической анатомии и физиологии растений.* Ленинград: Изд-во Ленинград. ун-та, 1978. С. 5-20. (Тр. Петергоф. ин-та; № 27).

65. Мовчан Я.И., Каневский В.А., Семичаевский В.Д., Левчик Е.И., Турута А.Е. Фитоиндикация в дистанционных исследованиях. Киев: Наук. думка, 1993. 305 с.

66. Кринов Е.Л. Спектральная отражательная способность природных образований. Москва: Изд-во АН СССР, 1947. 271 с.

67. Кондратьев К.Я., Козодеров В.В., Федченко П.П. Аэрокосмические исследования почв и растительности. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1986. 229 с.

68. Бранд А.Б., Тагеева С.В. Оптические параметры растительных организмов. Москва: Наука, 1967. 301 с.

69. Росс Ю.К. Радиационный режим и архитектоника растительного покрова. Ленинград, 1975. 342 с.

70. Suzuki R., Nomarki N., Yasunari T. Zonal transition of vegetation index over Siberia. *Res. Rep. IHAS.* 1998. № 4. P. 176-181.

71. Richard Y., Poccard I. A statistical study of NDVI sensitivity to seasonal and interannual rainfall variation in Southern Africa. *Int. J. Remote Sens*. 1998. Vol. 19, № 15. P. 2907-2920.

72. Matsuoka M., Tateishi R. Correction of reflection from AVHRR using time series model. *J. Jap. Soc. Photogramm. and Remote Sens.* 1998. Vol. 37, № 2. P. 4-14.

73. Viovy N., Saint G. Hidden Markov models applied to vegetation dynamics using satellite remote sensing. *IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens*. 1994. Vol. 32, № 4. P. 906-917.

74. Державна установа «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України». http://www.casre.kiev.ua uk

75. ASD FieldSpec3FR. User Manual ASD Document 600540 Rev. G. USA, 2007. 96 p.

РОЗДІЛ 3

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕМАТИЧНИХ ЗАДАЧ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ І ТЕСТОВИХ ДІЛЯНОК ДЗЗ У РІЗНИХ ЛАНДШАФТНО-ГЕОЛОГІЧНИХ УМОВАХ УКРАЇНИ

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 верифікацію космічної інформації ДЗЗ, полігони повинні задовольняти певним вимогам. Насамперед має враховуватись таке: 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. 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 [1, 2]. Концептуальний алгоритм проведення досліджень по наземній верифікації матеріалів космічних багатоспектральних (гіперспектральних) зйомок наведено на рис. 3.1.

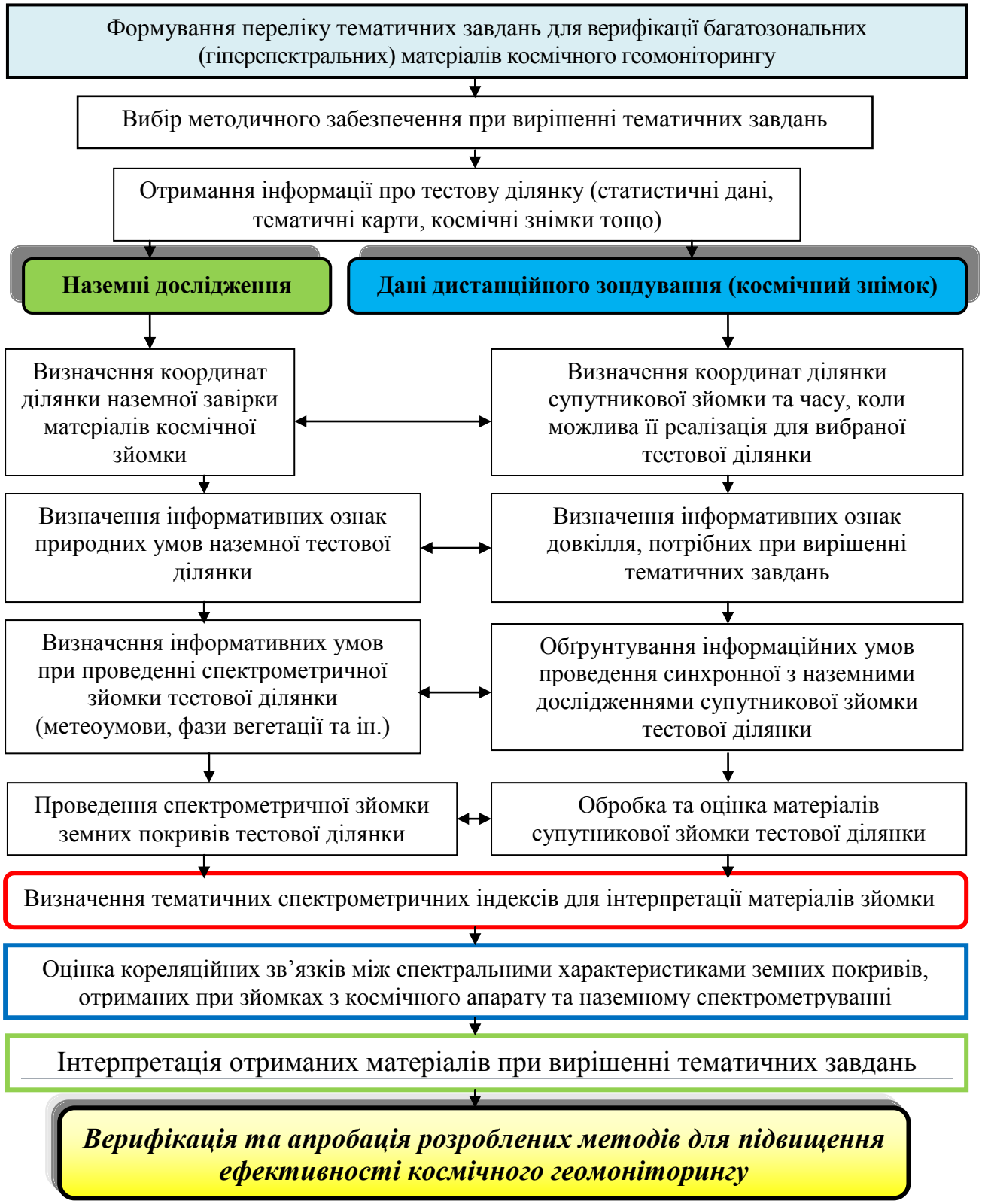


Рис. 3.1. Концептуальний алгоритм проведення досліджень по наземній завірці (валідації) матеріалів космічних багатоспектральних (гіперспектральних) зйомок

3.1. Особливості вибору та мережі тестових ділянок (полігонів) ДЗЗ для верифікації даних космічного геомоніторингу в Україні

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) наведено в табл. 3.1.

Оцінку і вибір мережі полігонів виконано, враховуючи ландшафтно-кліматичні зони України, специфіку тематичних завдань ДЗЗ та наявність діючої мережі наземних полігонів. Таким чином, щоб забезпечити необхідну наземну верифікацію космічної інформації ДЗЗ, полігони повинні задовольняти певним вимогам. У монографії [1-3] наводяться такі категорії вимог: 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 і стабільною.

Географічне розташування і розміри. При виборі місця розташування наземного полігону ДЗЗ слід враховувати насамперед ландшафтно-кліматичні та геолого-геоморфологічні особливості території, оскільки місцевий клімат, характерна рослинність і рельєф визначають структуру полігону і склад тестових об'єктів.

Таблиця 3.1

Ієрархічна модель оцінки і вибору космічних завірочних полігонів для забезпечення вирішення тематичних завдань ДЗЗ

***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**	**Вінницький**	**Миколаївський**	**Роменський**	**Карпатський**	**Кримський (Тарханкут)**	**Кримський (Кацівелі)**	**Кримський**	**Яворівський**	**Степовий заповідник**	**Харківський лісний полігон**	**Заповідник**	**Заповідник «Єланецький»**	**Дунайський заповідник**	**Полігон**	**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*

Методичне і технічне забезпечення для нормального функціонування тестових ділянок полігонів має включати великий обсяг польових вимірювань і спостережень [4]. 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 [5].

Сертифікація. Відповідно до міжнародних правил, кожен полігон ДЗЗ проходить процедуру сертифікації і паспортизується. В Україні загальні положення і порядок сертифікації викладені в стандартах [6, 7].

В нашій країні існує мережа полігонів з тестовими ділянками різного призначення та технічного стану для наземної верифікації (валідації) результатів дешифрування КЗ, верифікації нових методик ДЗЗ, формування тестових ділянок і дослідження випромінювально-відбивних спектральних характеристик об’єктів спостереження. Тому виникає практична проблема оцінки й вибору відповідного складу полігонів і тестових ділянок, параметри яких найбільше відповідають заданим тематичним задачам і сформульованим вище вимогам.

Обґрунтування формалізованого аналізу альтернативних варіантів існуючих полігонів, їх критеріальної оцінки і вибору на основі максимального значення пріоритетів для конкретної номенклатури тематичних задач ДЗЗ полігонів з відповідними тестовими ділянками для подальшого профілювання і спектрометричних досліджень в рамках вирішення поставлених тематичних задач ДЗЗ є дуже актуальним.

Метод аналізу ієрархій (МАІ). Аналіз і оцінка альтернативних варіантів полігонів неможливі за абсолютним значенням одного з параметрів (критеріїв), а потребують відносного зіставлення багатьох параметрів шляхом попарних експертних порівнянь ступеня переваги по кожному з них. Для цього підходить метод МАІ, заснований на лінгвістичному підході та експертній інформації [8]. МАІ набув широкого розповсюдження (особливо у США), на його основі

розроблено досить складні системи підтримки прийняття рішень у задачах аналізу об'єктів і ситуацій різного характеру (економічних, технічних, політичних, військових тощо). Метод дозволяє «зважити» в єдиній шкалі переваги і недоліки розглянутих альтернатив і одержати по кожній з них формалізовану узагальнюючу оцінку. На основі експертних оцінок сформувати необхідну цільову функцію і вибрати з багатьох альтернативних варіантів переважаючий для розв’язання поставленої задачі.

Основна проблема використання МАІ полягає у послідовній декомпозиції цільової функції на більш прості критеріальні складові – показники, що об’єднуються у відповідні ієрархічні рівні. Найбільш відповідальним етапом є побудова ієрархії суджень між першим і останнім рівнями. Задача першого рівня полягає у формуванні мети, яка буде досягнута в процесі розв’язання задачі.

МАІ має кілька етапів [9, 10]. Перший етап – структуризація задачі у вигляді ієрархічної структури з декількома рівнями: цілі – критерії – альтернативи. На другому етапі експерт виконує попарні порівняння елементів кожного рівня. Найбільш відповідальним етапом є побудова ієрархії суджень між початковим (мета, яка буде досягнута в процесі розв’язання задачі) і останнім рівнями. Результати порівнянь елементів кожного рівня переводяться в числа. Далі обчислюються коефіцієнти важливості для елементів кожного рівня. Перевіряється узгодженість суджень експертів. Обчислюється кількісний узагальнений критерій якості кожної з альтернатив і визначається найкраща альтернатива.

Коли розглянута проблема представлена ієрархічно, для формалізації експертної процедури будується множина матриць попарних порівнянь для кожного рівня і по кожній складовій даного ієрархічного рівня. Проводяться їх нормалізація та оцінка векторів пріоритетів з точки зору ступеня їх впливу на складові попереднього рівня. Подібні матриці повинні бути побудовані для попарних порівнянь кожної альтернативи на другому рівні стосовно спільної мети на першому рівні і т.д. При цьому зіставлення відбувається не за

абсолютними значеннями, а за ступенем відносної переваги по кожному параметру. Дана процедура виконується на кожному ієрархічному рівні, включаючи останній, для якого вираховуються пріоритети щодо ступеня їх впливу на передостанній рівень експертних суджень.

Елементи матриці – відношення абсолютних пріоритетів експертів, являють собою оцінки, судження експерта чи їх групи про відносну важливість окремих параметрів, що порівнюються по відношенню до критерію більш високого рівня, із заданою попередньо шкалою оцінок. Для зручності представлення подальших міркувань матриці попарних порівнянь, що завжди є квадратними і обернено симетричними, запишемо у вигляді:

$$\left\| a_{ij} \right\|, \; a_{ji} = \; / a_{ij} \; , \tag{3.1}$$

де $i, j = \; ,..., n$ – число критеріїв, порівнюваних на кожнім рівні.

Далі обчислюються компоненти власного вектора матриці, а саме:

$$a_1 = \left(\prod_{i=} \quad \right)^{\cdot / n} ;...; a_n = \left(\prod_{i=} \quad \right)^{\cdot / n} . \tag{3.2}$$

З отриманих груп матриць визначаються нормальні оцінки вектора локальних пріоритетів:

$$K_1 = a_1 \Big/ \sum_i a_i ;...; K_n = a_n \Big/ \sum_i a_i \; . \tag{3.3}$$

Після того як компоненти власного вектора отримані для всіх n рядків матриці відповідно до формули (3.2), стає можливим їхнє використання для подальших обчислень.

Одночасно з матрицею парних порівнянь виконується оцінка ступеня відхилення від узгодженості отриманих локальних пріоритетів шляхом обчислення індексу узгодженості (ІУ). ІУ в кожній матриці і для всієї ієрархії може бути приблизно обчислений так:

$$IУ = \left(\sum_{i=}^{n} K_i \sum_{j=}^{n} a_{ij} - n \right) \Big/ \left(\quad - \quad \right) \tag{3.4}$$

Ця величина порівнюється з тією, котра вийшла б при випадковому виборі кількісних суджень. Якщо розділити ІУ на число, що відповідає випадковій узгодженості матриці того ж порядку, одержимо відношення узгодженості.

Обробка матриць, наприклад, чотирьох рівнянь дає можливість вирахувати вектори пріоритетів відповідних рівнянь K^1, K^2, K^3 и K^4, компоненти яких визначають їх пріоритети з точки зору експерта. МАІ дозволяє сформувати необхідну цільову функцію й оцінити ступінь впливу на неї кожної з характеристик досліджуваної системи. В узагальненому критерії F перший рівень відповідає прийняттю рішення по всіх векторах цільових пріоритетів, другий – по вектору цільових пріоритетів, третій – по компонентах вектора цільових пріоритетів і четвертий – компонентах вектора пріоритетності показників порівнюваних альтернатив.

Якщо отримані всі необхідні вагові коефіцієнти, то формула згортки узагальненого критерію для порівнюваних варіантів має вигляд:

$$F = \sum {}^{1}\sum {}^{2}_{n}\sum {}^{3}_{\cdot}\sum {}^{4}_{,} \cdot x_p^s, \qquad (3.5)$$

де верхній індекс критеріального пріоритету означає рівень ієрархії;

x_p^s – коефіцієнт переваги варіанта s за показником p.

Значення F дозволяє встановити перевагу того чи іншого альтернативного варіанта системи по всій сукупності аналізованих факторів.

Для отримання формалізованої багатокритеріальної оцінки зазначених полігонів, структурування проблеми і представлення її у вигляді ієрархічної моделі було використано аналітичний ієрархічний процес, який реалізовано у МАІ.

Цей метод дає можливість на основі експертних оцінок сформувати необхідну цільову функцію, рейтингувати альтернативні варіанти. На основі вказаного була розроблена ієрархічна модель. На *нульовому* рівні сформульована мета досліджень – оцінка наземних полігонів для верифікації даних КГМ. Для кожного наступного рівня сформовані складові (критерії),

оцінка яких повинна виконуватися, виходячи із принципів синергетики з урахуванням всіх аспектів функціонування наземних полігонів (табл. 3.1).

На *першому рівні* оцінюється вплив основних напрямів використання космічної інформації ДЗЗ на формування характеристик наземних полігонів верифікації інформації КГМ. Це такі напрями: екологія і надзвичайні ситуації (НС), геологія (пошук корисних копалин і природні ресурси), сільське господарство, геодезія та картографія. При цьому враховуються вид та об’єми наземної верифікації космічної інформації ДЗЗ, які в кожному напрямі різні. У межах кожного напряму використання космічної інформації ДЗЗ розв’язуються різні тематичні задачі ДЗЗ. Їхня пріоритетність стосовно попереднього рівня також визначається експертом або групою експертів, що становить наступний *другий рівень* ієрархічної моделі.

Розв’язання тематичних задач ДЗЗ пов'язане з верифікацією космічної інформації геомоніторингу на наземних полігонах, характеристики яких повинні відповідати основним вимогам, що виходять з тематичних задач ДЗЗ. Ступінь впливу вимог до полігонів на якість наземної верифікації і відповідно на виконання кожної тематичної задачі ДЗЗ визначається експертом на *третьому рівні* моделі.

Відмітимо, що із наведених вище вимог до полігонів були використані такі: випромінювально-відбивні характеристики і географічне положення (відповідність ландшафтно-кліматичним зонам). Додатково були включені: орбітальне покриття поверхні спостереження і періодичність КА та відповідність даних наземної і космічної гіперспектральних зйомок.

Можливість орбітального покриття певних районів є ключовим елементом при виборі географічного положення полігону. Виділяють два важливих елементи при оцінці покриття: миттєве поле зору – площа, що переглядається приладом у будь-який довільний момент, і швидкість покриття – швидкість, із якою нова поверхня потрапляє в поле зору при русі супутника. Час повторного огляду (RT – Revisit time) – це показник, що звичайно використовують для оцінки орбітальних угруповань, які не досягають

безперервного покриття області на поверхні Землі. Час повторного огляду – це час, за який дане місце розташування на Землі не спостерігається орбітальною системою КА. Кращим визнається такий варіант угруповання, для якого значення критерію покриття RT найменше. Максимальний час повторного огляду всіх об'єктів, розташованих на території України, становить близько 2,7 доби [11].

Відповідність даних наземної і космічної гіперспектральних зйомок при наявності відмінностей в геометрії їх спостережень забезпечується створенням бази еталонних спектрів шляхом спектрометрування об’єктів спостереження під різними кутами [12-16].

Четвертій рівень ієрархічної моделі включає перелік полігонів, які необхідно оцінювати: Шацький, Київський (Міський), Київський (Агро), Вінницький, Миколаївський, Роменський, Карпатський, Кримський (Тарханкут), Кримський (Кацівелі), Кримський (Керч), Яворівський, Степовий заповідник, Харківський лісний полігон, Заповідник «Асканія Нова», Заповідник «Єланецький», Дунайський заповідник, Полігон «Чауда», Кримський (НЦУКВКЗ).

Експертне попарне порівняння елементів рівнів ієрархічної моделі та перевірка узгодженості оцінок для порівнюваних елементів. Відповідно до специфіки методу необхідно, щоб всі елементи нижнього рівня ієрархії були порівняні експертом попарно стосовно кожного елемента верхнього рівня аж до вершини ієрархії.

Згідно з ієрархічною моделлю, на першому рівні кожний з чотирьох напрямів характеризується своєю питомою вагою (коефіцієнтом важливості) з точки зору використання наземних полігонів для верифікації КГМ. Для розрахунку цих коефіцієнтів будується таблиця переваг (табл. 3.4), яка складається з матриці (четвертого порядку) попарних порівнянь напрямів використання космічної інформації ДЗЗ, стовпчиків послідовного обчислення вагових коефіцієнтів (вектора переваг) та стовпчика обчислення максимального (головного) власного значення матриці порівнянь $\lambda\max$, яке використовується для оцінки узгодженості за формулою (3.4).

На *четвертому* рівні ієрархічної моделі виконується попарне порівняння полігонів з точки зору їх відповідності вищезгаданим вимогам. У тому числі враховувалась експертна інформація, яка була отримана в результаті аналізу тематичних задач ДЗЗ і характеристик полігонів (табл. 3.2), де позначкою «+» відмічено придатність полігону для верифікації розв’язання тематичних задач ДЗЗ.

На наступному етапі для кожної з матриць попарних порівнянь розраховуються компоненти власного вектора матриці за формулою (3.6). З отриманих груп матриць визначаються нормальні оцінки вектора локальних пріоритетів за допомогою рівняння (3.6).

Перевірка узгодженості оцінок для порівнюваних об'єктів. Визначивши вектор пріоритетів, можна знайти головне власне значення матриці суджень λ_{max}, яке використовується для оцінки узгодженості, що відбиває пропорційність переваг. Чим ближче λ_{max} до розмірності матриці суджень (n), тим більше узгоджений результат. Обчислення λ_{max} здійснюється за наступною формулою:

$$\lambda_{\text{...ax}} = \sum_{j}^{n} \sum_{i}^{n} a_{ij} k_j \,, \tag{3.6}$$

де k_j – значення нормалізованої оцінки для j-об'єкта (по рядку); a_{ij} – значення оцінки парного порівняння об'єкта i з об'єктом j (елементи вибираються по стовпцях матриці парних порівнянь).

При парному порівнянні об'єктів необхідно виставити оцінку, що показує величину, на скільки один об'єктів переважніше іншого. Експерт може помилитися при порівнянні іншої пари об'єктів, що приведе до суперечливості результатів. Фахівці з логіки досліджують причини протиріч у судженнях експертів і дають рекомендації з розв'язання конфліктних ситуацій. Для виявлення суперечливості результатів, які запропонував експерт при заповненні матриці парних порівнянь використовується кількісна оцінка ІУ. ІУ – кількісна

Таблиця 3.2

Результати аналізу тематичних задач ДЗЗ і характеристик полігонів

Полігони	Тематичні задачі ДЗЗ										
	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	2.10	2.11
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		+		+			+	+			

оцінка суперечливості результатів порівнянь, що надає інформацію про ступінь порушення узгодженості. Разом з матрицею парних порівнянь ми маємо міру оцінки ступеня відхилення від узгодженості. Якщо такі відхилення перевищують установлені межі, то тому, хто проводить судження, варто перевірити ще раз їх у матриці. Відхилення від узгодженості може бути виражено величиною, що дорівнює відношенню різниці λ_{max} та $(n - 1)$:

$$ІУ = (\lambda_{max} - n)/(n - 1). \quad (3.7)$$

Для остаточного з'ясування узгодженості результатів парних порівнянь обчислюється кількісна оцінка відносної узгодженості (ВУ). ВУ – відношення індексу погодженості до середньостатистичного значення індексу узгодженості СУ при випадковому виборі коефіцієнтів матриці порівнянь. ВУ для системи, в цілому, характеризує зважене середнє значення ВУ для всіх матриць порівнянь. Відношення ІУ до середнього СУ для матриці того ж порядку називається відношенням узгодженості ВУ. Дані можна вважати практично несуперечливими (досить узгодженими), якщо значення відношення узгодженості менше ніж 0,1. Як поправочний коефіцієнт при остаточному з'ясуванні узгодженості оцінок у матриці парних порівнянь, використовується середнє значення випадкового індексу ВУ (табл. 3.3). Значення ВУ були отримані методом генерації ІУ випадковим чином по шкалі від 1 до 18 обернено-симетричної матриці. Середні значення випадкового індексу зібрані у вигляді табличних даних, фрагмент якого, залежно від розмірності матриці суджень, представлено у табл. 3.3.

Таблиця 3.3

Середнє значення розмірності матриці суджень

Розмір матриці - *n*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Випадкова узгодженість (ВУ)	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,48	1,56	1,57	1,59	1,61	1,65	1,67	1,69

Таблиця 3.4

Матриця попарних порівнянь першого рівня

ІУ = $(\lambda_{max} - n)/(n - 1) = 0{,}0231$

Основні напрями використання космічної інформації ДЗЗ	Екологія і НС	Геологія	Сільське господарство	Геодезія та картографія	$\prod_{j=1}^{n} \alpha$	$\alpha =$ $\left(\prod_{i=} \alpha\right)^{1/n}$	$K_i =$ $\alpha / \sum_i \alpha$ ..., $(X^1{}_{1,2,3,4})$	λ max
Екологія і НС	1	2	3	4	24	2,2133638	0,466851	0,972591
Геологія	0,5	1	2	3	3	1,3160740	0,277591	1,064091
Сільське господарство	0,3333	0,5	1	2	0,3333	0,7598166	0,1602635	1,041713
Геодезія та картографія	0,25	0,3333	0,5	1	0,04166	0,4517897	0,095293	0,952932
Сума	2,0833	3,8333	6,5	10		4,74104	1	4,031329

З табл. 3.4 випливає, що експерт при вирішенні проблеми віддає перевагу екології й пошуку корисних копалин. Після цього для даної матриці за описаною методикою розраховуються локальні пріоритети другого рівня критеріїв та їхня узгодженість. Необхідно заповнити чотири матриці парних порівнянь для другого рівня критеріїв (пріоритети тематичних задач КГМ.

Алгоритм обчислення вагових коефіцієнтів K_i (наприклад, $X^1{}_{1,2,3,4}$) складається з наступних кроків:

1) перемножуємо елементи кожного рядка й записуємо отримані результати в стовпчик;

2) беремо корінь *n-го* степеня з кожного елемента відповідного стовпчика;

3) складаємо елементи цього стовпчика;

4) ділимо кожний із цих елементів на отриману суму.

Нормалізовану оцінку для *j-го* об'єкта прийнято позначати, як k_j^i, де j – позначення об'єкта по рядку в матриці парних порівнянь; i – номер рівня ієрархії. У такий спосіб одержуємо вектор пріоритетів (власний стовпчик) (табл. 3.5-3.19).

Матриці попарних порівнянь другого рівня

Таблиця 3.5

Екологія і НС

ІУ = 0,0231

Екологія і НС O^2_1	Оцінка пожежної безпеки території	Моніторинг екологічного стану водойм	Моніторинг міських агломерацій	Визначення видового складу лісів	$\prod_{j=1}^{n} \alpha_{ij}$		$K_i = \alpha_i / \sum_i \alpha_i$ ..., $(X^2_{1/1,3,,2,5})$	λ_max
1 Оцінка пожежної безпеки території	1	2	3	4	24	2,2133	0,4668	0,9725
3 Моніторинг екологічного стану водойм	0,5	1	2	3	3	1,3160	0,2775	1,0640
2 Моніторинг міських агломерацій	0,3333	0,5	1	2	0,3333	0,7598	0,1602	1,0417
5 Визначення видового складу лісів	0,25	0,3333	0,5	1	0,04166	0,4517	0,0952	0,9529
Сума	2,0833	3,8333	6,5	10		4,7410	1	4,0313

Таблиця 3.6

Геологія (пошук корисних покладів і природні ресурси)

ІУ = 0,1665

Геологія (пошук корисних покладів і природні ресурси) O^2_2	Пошук покладів корисних	Дослідження геологічних структур ланд-шафтно-кліматичних зон	$\prod_{j=1}^{n} \alpha_{ij}$	α_{i}	$K_i = \alpha_i / \sum_i \alpha_i$ ..., $(X^2_{2/6-7})$	λ_max
6 Пошук покладів корисних копалин на суші	1	3	3	1,732	0,750	1
7 Дослідження геологічних структур ланд-шафтно-кліматичних зон	0,3333	1	0,3333	0,577	0,249	0,3333
Сума	1,3333	4		2,309	1	1,333

Таблиця 3.7

Сільське господарство

ІУ = 0,00418

Сільське господарство O^2_3	Моніторинг РП	Окреслення видових	Оцінка агрокультур і врожайності	$\prod_{j=1}^{n}\alpha_j$	α	$K_i = \alpha_i / \sum_i \alpha_i$ ..., $(X^2_{3/4,8,9})$	λ_max
4 Моніторинг РП	1	2	3	6	1,8171	0,5396	0,9892
8 Окреслення видових угруповань	0,5	1	2	1	1	0,2974	1,0394
9 Оцінка агрокультур і врожайності	0,333	0,5	1	0,1665	0,5501	0,1634	0,9803
Сума	1,833	3,5	6		3,3672	1	3,00886

Таблиця 3.8

Геодезія та картографія

ІУ = 0,1468665

Геодезія та картографія O^2_4	Картографування продуктивності екосистем	Картографування розповсюдження спричинених стресів	$\prod_{j=1}^{n}\alpha_j$	α	$K_i = \alpha_i / \sum_i \alpha_i$ ..., $(X^2_{4,10\text{-}11})$	λ_max
10 Картографування продуктивності екосистем	1	2	2	1,4142	0,6667	0,88891111
11 Картографування розповсюдження спричинених стресів	0,5	1	0,5	0,7071	0,3333	1,3332
Сума	1,05	3			1	2,22209

Матриці попарних порівнянь третього рівня

Таблиця 3.9

Оцінка пожежної безпеки території

ІУ = 0,019125

Оцінка пожежної безпеки території O^3_1	Географічне положення	Відповід-ність даних	Орбітальне покриття	Випромінюв-ально-відбивні характери-стики	$\prod_{j=1}^{n}\alpha_{ij}$	α_{i}	$X^3_{1,1-i}$	λ_{i} max
Географічне положення	1	0,2	0,143	0,5	0,0143	0,3457	0,0621	0,9316
Відповідність даних наземної і космічної гіперспектральної зйомок	5	1	0,333	2	3,333	1,3512	0,2427	1,1408
Орбітальне покриття	7	3	1	5	105	3,2011	0,5750	0,9639
Випромінювально-відбивні характеристики	2	0,5	0,2	1	0,2	0,6687	0,1201	1,02119
Сума	15	4,7	1,676	8,5		5,5667	1	λ_{max} =4,0574

Таблиця 3.10

Моніторинг міських агломерацій

ІУ = 0,02918

Моніторинг міських агломерацій O^3_2	Географічне положення	Відповідність даних	Орбітальне покриття	Випромінювально-відбивні характеристики	$\prod_{j=1}^{n}\alpha_{ij}$	α_{i}	$X^3_{2,1-i}$	λ_{i} max
Географічне положення	1	0,25	0,1428	0,2	0,0072	0,2907	0,0562	0,9564
Відповідність даних наземної і космічної гіперспектра-льної зйомок	4	1	2	3	24	2,2134	0,4283	0,8923
Орбітальне покриття	7	0,5	1	3	10,5	1,8001	0,3483	1,2109
Випромінювально-відбивні характеристики	5	0,333	0,333	1	0,5555	0,8633	0,1671	1,2029
Сума	17	2,083	3,4762	7,2	17	5,1675	1	λ_{max} =4,2625

Таблиця 3.11

Моніторинг екостану водойм

ІУ = 0,11967

Моніторинг екостану водойм O^3_3	Географічне положення	Відповідність даних	Орбітальне покриття	Випромінювально-відбивні характеристики	$\prod_{j=1}^{n}\alpha_j$	α_j	$X^3_{3,1-j}$	
Географічне положення	1	0,1428	0,2	0,125	0,0036	0,2445	0,0431	0,9050
Відповідність даних наземної і космічної гіперспектральної зйомок	7	1	3	3	63	2,8173	0,4966	0,8987
Орбітальне покриття	5	0,3333	1	0,25	0,4167	0,8034	0,1416	1,16143
Випромінювально-відбивні характеристики	8	0,3333	4	1	10,666	1,8072	0,3186	1,3938
Сума	21	1,8095	8,2	4,375	21	5,6724	1	λ_{max} =4,3591

Таблиця 3.12

Моніторинг рослинного покриву

ІУ = 0,07914

Моніторинг РП O^3_4	Географічне положення	Відповідність даних	Орбітальне покриття	Випромінювально-відбивні характеристи	$\prod_{j=1}^{n}\alpha_j$	α_j	$X^3_{4,1-j}$	
Географічне положення	1	0,333	3	0,1111	0,111	0,577	0,0907	1,2093
Відповідність даних наземної і космічної гіперспектральної зйомок	3	1	4	0,2	2,4	1,2447	0,195	1,28731
Орбітальне покриття	0,3333	0,25	1	0,1428	0,012	0,330	0,05189	0,7784
Випромінювально-відбивні характеристики	9	5	7	1	315	4,21291	0,6619	0,9623
Сума						6,3652	1	λ_{max} =4,2374

Таблиця 3.13

Визначення видового складу лісів

ІУ = 0,20324

Визначення видового складу лісів O^3_5	Географічне положення	Відповідність даних	Орбітальне покриття	Випромінювально-відбивні характеристи	$\prod_{j=1}^{n}\alpha_{ij}$	α_{i}	$X^3_{5,1-}$	
Географічне положення	1	3	4	3	36	2,4495	0,458	0,8778
Відповідність даних наземної і космічної гіперспектрлаьної зйомок	0,3333	1	5	0,2	0,3333	0,7598	0,1421	1,3071
Орбітальне покриття	0,25	0,2	1	0,14286	0,0071	0,2907	0,0543	0,9240
Випромінювально-відбивні характеристики	0,3333	5	7	1	11,6665	1,8481	0,3456	1,5007
Сума	13,3333	6,583	15	1,45397		5,348	1	λ_{max} =4,6097

Таблиця 3.14

Пошук покладів корисних копалин

ІУ = 0,22353

Пошук покладів корисних копалин O^3_6	Географічне положення	Відповідність даних	Орбітальне покриття	Випромінювально-відбивні характеристи	$\prod_{j=1}^{n}\alpha_{ij}$	α_{i}	$X^3_{6,1-}$	
Географічне положення	1	7	5	3	105	3,2011	0,52492	0,8799
Відповідність даних наземної і космічної гіперспектраьної зйомок	0,1428	1	8	0,1667	0,19045	0,6606	0,10833	1,5302
Орбітальне покриття	0,2	0,125	1	0,125	0,0031	0,2364	0,03877	0,8529
Випромінювально-відбивні характеристики	0,333	6	8	1	15,9999	1,9999	0,32796	1,4075
Сума	5,34	12,33	18	1,5595		6,0981	1	λ_{max} =4,6706

Таблиця 3.15

Дослідження геологічних структур

ІУ = 0,12049

Дослідження геологічних структур O^3_7	Географічне положення	Відповідність даних	Орбітальне покриття	Випромінювально-відбивні характеристи	$\prod_{j=1}^{n}\alpha_{-,j}$	Корінь 4-го степеня від добутку	$X^3_{7,1-}$	
Географічне положення	1	5	7	0,25	8,75	1,7199	0,2788	1,4894
Відповідність даних наземної і космічної гіперспектраьної зйомок	0,2	1	3	0,1667	0,1	0,5623	0,0911	1,1241
Орбітальне покриття	0,1428	0,333	1	0,1428	0,0068	0,2872	0,0465	0,8378
Випромінювально-відбивні характеристики	4	6	7	1	168	3,6002	0,5835	0,91
Сума	5,3428	12,33	18	1,559		6,1696	1	$\lambda_{max\,x}$=4,3615

Таблиця 3.16

Окреслення видових угруповань

ІУ = 0,12049

Окреслення видових угруповань	Географічне положення	Відповідність даних	Орбітальне покриття	Випромінювально-відбивні характеристик	$\prod_{j=1}^{n}\alpha_{-,j}$	α_{-}	$X^3_{8,1-}$	
Географічне положення	1	3	0,25	5	3,75	1,3916	0,2801	1,5502
Відповідність даних наземної і космічної гіперспектральної зйомок	0,3333	1	3	6	5,999	1,5651	0,3151	1,4179
Орбітальне покриття	4	0,333	1	7	9,3332	1,7479	0,3519	1,5457
Випромінювально-відбивні характеристики	0,2	0,166	0,1428	1	0,0048	0,2627	0,0529	1,0048
Сума						4,9672	1	λ_{max}=5,5186

Таблиця 3.17

Оцінка агрокультур і врожайності

ІУ = 0,3087

Оцінка агрокультур і врожайності O^3_9	Географічне положення	Відповідність даних	Орбітальне покриття	Випромінювально-відбивні характеристики	$\prod_{j=1}^{n} \alpha_{ij}$	α	$X^3_{9,1-}$	
Географічне положення	1	5	4	6	120	3,3098	0,5794	0,9367
Відповідність даних наземної і космічної гіперспектральної зйомок	0,2	1	5	4	4	1,4142	0,2476	1,5969
Орбітальне покриття	0,25	0,2	1	4	0,2	0,6687	0,1170	1,2
Випромінювально-відбивні характеристики	0,1667	0,25	0,25	1	0,0104	0,3195	0,0559	0,839
Сума						5,7122	1	λ_{max}=4,5725

Таблиця 3.18

Картографування продуктивності екосистем

ІУ = 0,3087

Картографування продуктивності екосистем O^3_{10}	Географічне положення	Відповідність даних	Орбітальне покриття	Випромінювально-відбивні характеристики	$\prod_{j=1}^{n} \alpha_{ij}$	α	$X^3_{10/1-}$	
Географічне положення	1	5	4	6	120	3,3098	0,5794	0,9367
Відповідність даних наземної і космічної гіперспектральної зйомок	0,2	1	5	4	4	1,4142	0,2476	1,5969
Орбітальне покриття	0,25	0,2	1	4	0,2	0,6687	0,1170	1,2
Випромінювально-відбивні характеристики	0,1667	0,25	0,25	1	0,0104	0,3195	0,0559	0,839
Сума						5,7122	1	λ_{max}=4,5725

Таблиця 3.19

Картографування розповсюдження спричинених стресів

Картографування розповсюдження спричинених стресів O^3_{11}	Географічне положення	Відповідність даних	Орбітальне покриття	Випромінювально-відбивні характеристики	$\prod_{j=1}^{n}\alpha_{ij}$	α_{i}	$X^3_{11/1-i}$	
Географічне положення	1	3	0,25	5	3,75	1,3916	0,2801	1,5502
Відповідність даних наземної і космічної гіперспектральної зйомок	0,3333	1	3	6	5,999	1,5651	0,3151	1,4179
Орбітальне покриття	4	0,333	1	7	9,3332	1,7479	0,3519	1,5457
Випромінювально-відбивні характеристики	0,2	0,166	0,1428	1	0,0048	0,2627	0,0529	1,0048
Сума						4,9672	1	λ_{max}=5,5186

Обчислення локальних і глобальних пріоритетів оцінок тестових ділянок завіркових полігонів. Після того як компоненти власного вектора отримані для всіх n рядків матриці, за формулою (3.3) визначається вектор локальних пріоритетів критеріальних складових кожного рівня ієрархії. Далі за значеннями векторів локальних пріоритетів K^1, K^2, K^3 і K^4 знаходяться значення згортки узагальненого критерію для порівнюваних полігонів за (3.5).

Отримані результати попарних порівнянь використовуються для формування остаточної оцінки і вибору полігонів. Після отримання всіх необхідних вагових коефіцієнтів маємо формулу згортки узагальненого критерію (3.5) для порівнюваних полігонів.

Зіставлення значень згортки узагальненого критерію F для порівнюваних полігонів дозволяє оцінити полігони за всією сукупністю складових, що визначають ієрархію, за формулою (3.8).

Маючи оцінки третього рівня, обчислюємо оцінки другого рівня, тобто враховуємо ще оцінки задач відносно напрямів використання, за (3.9).

Нарешті обчислюємо остаточні, глобальні оцінки, враховуючи важливість напрямів використання, згідно з формулою (3.10).

$$
\begin{aligned}
P^3_{1,1-8} &= \left(X^4_{1,1-8}\ X^4_{2,1-8}\ X^4_{3,1-8}\ X^4_{4,1-8}\right) \bullet \left(X^3_{1,1-\ }\right) \\
P^3_{3,1-8} &= \left(X^4_{1,1-8}\ X^4_{2,1-8}\ X^4_{3,1-8}\ X^4_{4,1-8}\right) \bullet \left(X^3_{3,1-\ }\right) \\
P^3_{2,1-8} &= \left(X^4_{1,1-8}\ X^4_{2,1-8}\ X^4_{3,1-8}\ X^4_{4,1-8}\right) \bullet \left(X^3_{2,1-\ }\right) \\
P^3_{5,1-8} &= \left(X^4_{1,1-8}\ X^4_{2,1-8}\ X^4_{3,1-8}\ X^4_{4,1-8}\right) \bullet \left(X^3_{5,1-\ }\right) \\
P^3_{6,1-8} &= \left(X^4_{1,1-8}\ X^4_{2,1-8}\ X^4_{3,1-8}\ X^4_{4,1-8}\right) \bullet \left(X^3_{6,1-\ }\right) \\
P^3_{7,1-8} &= \left(X^4_{1,1-8}\ X^4_{2,1-8}\ X^4_{3,1-8}\ X^4_{4,1-8}\right) \bullet \left(X^3_{7,1-\ }\right) \\
P^3_{4,1-8} &= \left(X^4_{1,1-8}\ X^4_{2,1-8}\ X^4_{3,1-8}\ X^4_{4,1-8}\right) \bullet \left(X^3_{4,1-\ }\right) \\
P^3_{8,1-8} &= \left(X^4_{1,1-8}\ X^4_{2,1-8}\ X^4_{3,1-8}\ X^4_{4,1-8}\right) \bullet \left(X^3_{8,1-\ }\right) \\
P^3_{9,1-8} &= \left(X^4_{1,1-8}\ X^4_{2,1-8}\ X^4_{3,1-8}\ X^4_{4,1-8}\right) \bullet \left(X^3_{9,1-\ }\right) \\
P^3_{10,1-8} &= \left(X^4_{1,1-8}\ X^4_{2,1-8}\ X^4_{3,1-8}\ X^4_{4,1-8}\right) \bullet \left(X^3_{10,1-\ }\right) \\
P^3_{11,1-8} &= \left(X^4_{1,1-8}\ X^4_{2,1-8}\ X^4_{3,1-8}\ X^4_{4,1-8}\right) \bullet \left(X^3_{11,1-\ }\right)
\end{aligned}
\tag{3.8}
$$

$$
\begin{aligned}
P^2_{1,1-8} &= \left(P^3_{1,1-8}\ P^3_{3,1-8}\ P^3_{2,1-8}\ P^3_{5,1-8}\right) \bullet \left(X^2_{2,(1,3,2,5)}\right) \\
P^2_{2,1-8} &= \left(P^3_{6,1-8}\ P^3_{7,1-8}\right) \bullet \left(X^2_{2,(6-\ )}\right) \\
P^2_{3,1-8} &= \left(P^3_{1,1-8}\ P^3_{8,1-8}\ P^3_{9,1-8}\right) \bullet \left(X^2_{2,(1,8,9)}\right) \\
P^2_{4,1-8} &= \left(P^3_{10,1-8}\ P^3_{11,1-8}\right) \bullet \left(X^2_{2,(10,11)}\right).
\end{aligned}
\tag{3.9}
$$

$$
F_{1-8} = \left(P^2_{1,1-8}\ P^2_{2,1-8}\ P^2_{3,1-8}\ P^2_{4,1-8}\right) \bullet \left(X^1_{1-\ }\right). \tag{3.10}
$$

Зіставлення значень згортки узагальненого критерію *F,* розрахованого за формулою (3.5), для порівнюваних полігонів дозволяє оцінити їх придатність для верифікації інформації КГМ і вирішення тематичних завдань ДЗЗ за всією сукупністю складових.

На основі отриманих критеріальних оцінок *F*, з врахуванням ландшафтно-кліматичних зон України та фактичного стану полігонів для їх досліджень і використання були вибрані такі наземні полігони: Київський (Міський) та Київський (Агро), Шацький, Вінницький, Миколаївський та Кримський [16].

3.2. Приклад верифікації гіперспектральних супутникових та наземних даних на Київському полігоні (тестовій ділянці) ДЗЗ

ДЗЗ за допомогою супутникових гіперспектральних сенсорів є потужним інструментом для тривалого геомоніторингу РП. Гіперспектральні зображення, які мають достатню просторову розрізненність, щоб описати діагностичні сигнатури, враховують відмінності між різновидами рослин і рослинності від різних типів ґрунтів та мінералів. Однак недостатньо або зовсім не було проведено досліджень довготривалого геомоніторингу змін РП через відсутність багаточасових гіперспектральних даних та надійних методів отримання інформації про стресові зміни на підставі аналізу даних ДЗЗ. Використання REP для класифікації земного покриву за даними аерознімання розглянуто в праці [27], за даними космознімання – в роботах [12, 17, 18]. Також у публікації [27] проведено зіставлення гіперспектральних даних аерознімання та наземних вимірювань при визначенні спектральних зсувів REP.

Дані, одержані супутниковими сенсорами, залежать як від типу сенсора, так і від часу знімання земної поверхні. Спектральні вегетаційні індекси, обчислені за цими даними для однієї і тієї ж ділянки поверхні, можуть залежати також від рівня обробки даних і відрізнятися від індексів, вирахованих за результатами наземних спектрометричних вимірювань. Тому порівняльному аналізу спектральних індексів для певного типу земного покриву, обчислених за різними джерелами даних, приділяється значна увага [12, 17-19, 27-29].

«*Hyperion*» – перший в світі гіперспектральний відеоспектрометр, встановлений на борту супутника *EO-1*, запущеного NASA 21 березня 2000 р. (рис. 3.2). Він має 220 спектральних каналів у діапазоні від 400-2500 нм. Спектральна розрізненність його каналів в оптичному та близькочервоному (NIR) діапазонах становить 10 нм, а просторова розрізненність – 30 м для всіх каналів. Ширина стандартної сцени зйомки – 7,7 км, довжина – 42 км. Альтитуда його орбіти ~ 705 км, така ж як і в ««Landsat-7».

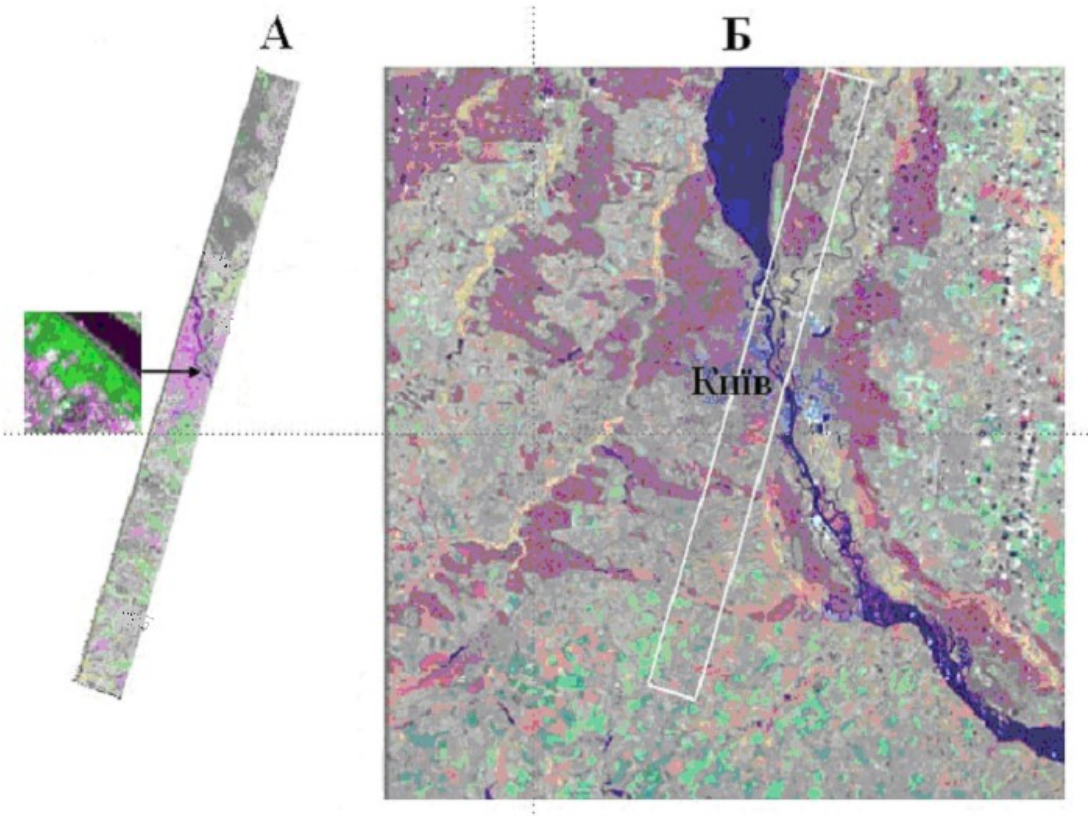


Рис. 3.2. Синтезоване зображення знімка ЕО-1 «Hyperion» (14.09.2002) в межах Київського регіону (синтез каналів 20, 30 та 40) (А) та синтезоване зображення знімка «Landsat» ETM (14.09.2001) (синтез каналів 2, 4, 5) (Б). Білий прямокутник на знімку «Landsat» ETM вказує на розташування знімка «Hyperion». Фрагмент знімка ЕО-1 «Hyperion» показує ділянку детальних досліджень в межах загальної сцени

В межах сцени для дослідження відбивних характеристик та вегетаційних індексів певних видів земного покриву виділено ділянку (рис. 3.2), для аналізу діапазонів змін вегетаційних індексів за даними *«Hyperion»* для основних різновидів РП та земної поверхні.

Наземні вимірювання спектрів відбиття від вибраних мішеней земного покриву зроблено за допомогою спектрорадіометра FieldSpec3FR [30]. Діапазон вимірювань приладу – 350-2500 нм. Спектральна розрізненність – 3 нм в діапазоні 350-1000 нм. Всі спектри були виміряні в надір. Дистанція між спектрорадіометром і мішенню становила приблизно 1 м. Вимірювання

спектрів на набережній Дніпра проведено 15.04.2009 р. і 16.09.2009 р. За мішені земного покриву вибрано асфальтову дорогу і траву пирію на узбіччі набережної. Вимірювання спектрів трав'яного покриву та трибун на стадіоні «Динамо» м. Київ зроблено 16.09.2009 р. об 11-й годині за місцевим часом.

Зіставлення даних наземної спектрометрії для вибраних класів покриву із даними космозйомки вказують на необхідність гармонізації даних космознімання, які зазнають значних атмосферних впливів, з даними наземної зйомки, що вимагає додаткової обробки. При цьому можливі різні рівні обробки: з атмосферною корекцією даних і без корекції.

До останнього часу методиці визначення REP за даними космознімання не приділялося належної уваги через відсутність на супутниках відповідних спектрометрів з достатньою кількістю каналів в зоні червоного краю. Наведемо формули обчислення REP з використанням даних сенсора *EO-1 «Hyperion»* та даних спектрорадіометра FieldSpec3FR, які відрізняються між собою через неоднакове розташування спектральних каналів в області червоного краю. Вперше визначення позиції червоного краю за даними *EO-1 «Hyperion»* здійснено в [26]. Згідно з методом чотириточкової лінійної інтерполяції, REP за даними *EO-1 «Hyperion»* визначається [26] за формулою:

$$
\begin{aligned}
REP &= 701.55 + 40.7\frac{(\overline{R} - R_{35})}{(R_{39} - R_{35})} = \\
&701.55 + 40.7\frac{(\overline{R} - R(701.55))}{(R(742.25) - R(701.55))}, \\
\overline{R} &= \frac{R_{32} + R_{43}}{2.} = \frac{R(671.02) + R(782.95)}{2.},
\end{aligned}
\tag{3.11}
$$

де $R(\lambda)$ – значення коефіцієнта відбиття на довжині хвилі λ.

Тут R_i – значення коефіцієнта відбиття в і-му каналі, і = 32, 35, 39, 43. Зауважимо, що обчислені різними способами значення REP можуть не співпадати, а метод (3.11) є оптимальним щодо часу обчислень в порівнянні з іншими методами [26].

Згідно з методом чотириточкової лінійної інтерполяції, REP за даними спектрорадіометра FieldSpec3FR визначається за формулами:

$$REP = 701. + 41.\frac{(\overline{R} - R(701))}{(R(742) - R(701))},$$
$$\overline{R} = \frac{R(671) + R(783)}{2.}. \qquad (3.12)$$

В табл. 3.20 наведено значення довжин хвиль, близьких до значень центрів каналів «Hyperion», які використовуються для обчислення REP за формулою (3.11).

Таблиця 3.20

Порівняльна таблиця значень довжин хвиль сенсора EO-1 «Hyperion» та спектрорадіометра FieldSpec3FR для обчислення REP методом чотириточкової лінійної інтерполяції

Сенсор EO-1 « Hyperion»		Спектрорадіометр FieldSpec3FR
№ каналу	Довжина хвилі центра каналу λ (нм)	Довжина хвилі, близька до відповідних значень центрів каналів λ(нм)
32	671,02	671,00
35	701,55	701,00
39	742,25	742,00
43	782,95	783,00

Метод поліноміальної апроксимації спектрів відбиття. Метод полягає в апроксимації спектрів відбиття поліномами n-го степеня у вигляді:

$$R(\lambda) = C_0 + \sum_{i=1}^{n} C_i T_i(\lambda), \qquad (3.13)$$

де $T_i(\lambda)$, i = 1, 2, 3,…,n – поліноми Чебишова (або степеневі) i-го степеня 1-го роду [24]; коефіцієнти C_i визначаються методом найменших квадратів; $R(\lambda)$ – величина коефіцієнта відбиття на довжині хвилі λ.

Першу $R'(\lambda)$ і другу похідну $R''(\lambda)$ функції $R(\lambda)$ визначаємо диференціюванням за змінною λ. За визначенням, REP – це значення довжини хвилі $\lambda \in 670, 780$ нм, на якому перша похідна функції $R'(\lambda)$ досягає максимуму, а $R''(REP) = 0$ і змінює знак при переході через точку $\lambda = REP$ з плюса на мінус.

Наведеними вище методами були обчислені за даними тестових спектрів відбиття земного покриву, одержаних за допомогою спектрорадіометра FieldSpec3FR 15.04.2009 р., коефіцієнти апроксимуючих поліномів для значень n = 4, 5, 9 і відповідні значення позиції червоного краю. Результати обчислень наведено в табл. 3.21-3.25. Для обробки даних брали значення коефіцієнтів відбиття з проміжку 600-900 нм із кроком 10 нм, який відповідає спектральній розрізненності сенсора *«Hyperion»*.

В табл. 3.21, 3.22 наведено результати поліноміальної апроксимації тестових спектральних коефіцієнтів відбиття пирію на набережній Дніпра сумами з n членів ряду з поліномів Чебишова 1-го роду на проміжку 600-900 нм для значень n = 4, 5 і 9. В таблицях подано значення коефіцієнтів апроксимуючих поліномів та відповідні значення позиції червоного краю REP.

Із наведених в табл. 3.21 і 3.22 результатів обчислень випливає, що величина REP суттєво залежить від степеня апроксимуючого полінома; причому збільшення степеня з n = 5 до n = 9 не покращує точності визначення REP, оскільки значення коефіцієнтів C_i в формулі (3.13) починаючи із C_5, близькі до 0.

В табл. 3.23 наведено значення REP для тестових спектрів, обчислені за формулою чотириточкової лінійної інтерполяції (3.12) та методом поліноміальної апроксимації (3.13) n = 5. Наведені результати показують, що для даних наземної зйомки значення REP, обчислені за формулою (3.12), близькі до значень, одержаних внаслідок поліноміальної апроксимації при n=5. Крім того, вони мають перевагу в тому, що потребують значно меншого числа обчислень, що має суттєве значення при вирахуванні позиції червоного краю за даними гіперспектральної космозйомки та особливо при попіксельному

обчисленні позиції червоного краю для побудови REP-зображень за даними сенсора *EO-1 «Hyperion»*.

Наведеними вище методами обчислено значення REP для трьох спектрів відбиття вибраних представників наземного покриву тестових ділянок, одержаних у результаті наземної зйомки спектрорадіометром FieldSpec3FR 15.04.2009 р. Результати вирахувань наведено в табл. 3.24. Зіставлення значень REP для одного і того ж класу наземного покриву, обчислених різними методами, свідчить про те, що для трав'яного покриву значення REP, обчислені методом поліноміальної апроксимації при n = 5, найближчі до значень, одержаних методом чотириточкової лінійної інтерполяції. Для не РП значення REP, отримані поліноміальним методом, більші, ніж значення, обчислені методом чотириточкової лінійної інтерполяції; причому різниця між ними перевищує 10 нм для спектрів відбиття як набережної Дніпра, так і трибун стадіону «Динамо».

Для зіставлення гіперспектральних даних наземної та космозйомки значення REP, обчислені методом чотириточкової лінійної інтерполяції, для спектрів відбиття трибун і трав'яного покриву стадіону 16.09.2009 р. та діапазони значень REP, визначені при автоматизованій класифікації REP-зображень фрагмента тестових ділянок, визначених за значеннями атмосферно некоригованих та коригованих даних [18] сенсора *EO-1 «Hyperion»* 14.09.2002 р., наведено в табл. 3.25.

Як свідчать подані в табл. 3.25 результати зіставлення значень REP за даними наземної та космічної зйомок, класифікація трав'яного покриву за REP-зображеннями, побудованими за атмосферно коригованими супутниковими даними, точніша, ніж за некоригованими даними сенсора *EO-1 «Hyperion»*. На це вказує те, що значення REP = 722,05 нм, обчислені за даними наземної зйомки, не входить в діапазон значень для трав'яного покриву стадіону, виділених для цього типу покриву при автоматизованій класифікації REP-зображень за атмосферно некоригованими даними [18].

Для спектрів відбиття трибун значення REP за даними наземних вимірювань входять в інтервал значень для техногенних споруд, визначених при автоматизованій класифікації REP-зображень фрагмента тестової ділянки у випадку як атмосферно коригованих, так і некоригованих даних сенсора EO-1 «Hyperion» [13].

Таблиця 3.21

Результати обробки спектра відбиття пирію з частково засохлим листям на набережній Дніпра, одержані методом поліноміальної апроксимації з використанням поліномів Чебишова 1-го роду

Степінь апроксимуючого полінома	Коефіцієнти апроксимуючого полінома C_i	Значення REP (нм)	Середнє квадратичне відхилення ($*10^{-2}$)
4	C_0=0.4616, C_1=0.2730, C_2=-0.0115, C_3=-0.0410,C_4=0.0167	705	9,08
5	C_0=0.4616, C_1=0.3010, C_2=-0.0115, C_3=-0.0351, C_4=0.0167, C_5=0.0033	717	8,58
9	C_0=0.4424, C_1=0.2952, C_2=-0.0252, C_3=-0.0359, C_4=0.0138, C_5=0.003,5 C_6=-0.0038, C_7=0.0003,C_8=0.0006, C_9=-0.0001	714	2,71

Таблиця 3.22

Результати обробки спектра відбиття зеленого пирію на набережній Дніпра, одержані методом поліноміальної апроксимації з використанням поліномів Чебишова 1-го роду

Степінь апроксимуючого полінома	Коефіцієнти апроксимуючого полінома C_i	Значення REP (нм)	Середнє квадратичне відхилення ($*10^{-2}$)
4	C_0=0.4309, C_1=0.2562 C_2=-0.0104, C_3=-0.0376 C_4=0.0152	705	9,41
5	C_0=0.4309, C_1=0.2830 C_2=-0.0104, C_3=-0.0319 C_4=0.0152, C_5=0.0032	720	8,90
9	C_0=0.4135, C_1=0.2771 C_2=-0.0229, C_3=-0.0328 C_4=0.0125, C_5=0.0033 C_6=-0.0036, C_7=0.0003 C_8=0.0006, C_9=-0.0001	714	3,29

Таблиця 3.23

Зіставлення значень REP спектральних коефіцієнтів відбиття зеленого пирію і пирію із частково засохлим листям на набережній Дніпра, обчислених різними методами

Методи обчислення REP	Значення REP (нм)		ΔREP (нм)
	Спектр зеленого пирію	Спектр пирію із частково засохлим листям	
Метод поліноміальної Апроксимації, n=5	720	717	3
Метод чотириточкової лінійної інтерполяції	719,91	719,08	0,83

Таблиця 3.24

Зіставлення значень REP спектральних коефіцієнтів відбиття представників трьох класів наземного покриву, обчислених різними методами за даними наземної зйомки на тестових ділянках (16.09.2009 р.)

Порядковий номер та назва спектра	Значення REP (нм)		|ΔREP| (нм)
	Метод поліноміальної апроксимації (n – степінь полінома)	Метод чотириточкової лінійної інтерполяції	
1.Асфальтова дорога (набережна Дніпра)	756 (n = 4) 753 (n = 5) 744 (n = 9)	739,12	15,88 12,88 3,88
2.Трибуна стадіону «Динамо»	735 (n = 4) 744 (n = 5) 735 (n = 9)	732,98	2,02 11,02 2,02
3.Трав'яний покрив стадіону «Динамо»	711 (n = 4) 726 (n = 5) 713 (n = 9)	722,05	11,05 3,95 9,05

Таблиця 3.25

Зіставлення значень REP за даними сенсора EO-1 «Hyperion» (14.09.2002 р.) та спектрорадіометра FieldSpec3FR (16.09.2009 р.) для спектрів вибраних класів наземного покриву на тестових ділянках

Порядковий номер та тип покриву	Значення REP (нм) за даними наземної та космічної зйомок		
	За даними польового спектрорадіометра FieldSpec3FR	**За даними EO-1 «Hyperion»**	
		Атмосферно некориговані дані	Атмосферно кориговані дані
1.Трибуна стадіону «Динамо»	732,98	min=731 max=745,8	min=732,1 max=737,4
2.Трав'яний покрив стадіону «Динамо»	722,05	min=725,5 max=726,5	min=720,1 max=723,4

Застосування гіперспектральних індексів для визначення змін трав'яного покриву за даними спектрометричної зйомки. В останні роки багато уваги приділяється геомоніторингу наземного покриву паркових та припаркових зон методами ДЗЗ з метою виявлення урбаністичного впливу. Проблеми, які при цьому виникають і концептуальний підхід до їх вирішення методами ДЗЗ розглядаються в працях [25, 31-33].

В роботі продовжено дослідження характеру змін індексів REP і TCI за даними щорічної спектрометричної зйомки трав'яного покриву на тестових ділянках у м. Київ [13]: на стадіоні "Динамо", Маріїнському парку, на набережній Дніпра. Спектрометрування здійснено спектрорадіометром FieldSpec3FR з 16 вересня 2009 р. до 7 червня 2013 р. Визначено індекси червоного краю REP і TCI за даними спектрометрування трав'яного покриву для геомоніторингу змін у точках спостереження. Встановлено кореляційний зв'язок між індексами. Подано оцінку можливості прогнозування зміни REP в залежності від TCI через побудову моделі лінійної регресії і можливості прогнозування змін трав'яного покриву за змінами значень індексу REP, зокрема ідентифікації вегетаційного стресу при зсуві REP, на підставі побудованої моделі лінійної регресії залежності REP від TCI. Зауважимо, що

вперше можливість використання хлорофільного індексу TCI як індикатора вегетаційного стресу, спричиненого просочуванням природного газу над газосховищем, встановлено авторами робіт [35-37]. Вказано на можливість використання індексу TCI для визначення змін стану РП за даними космознімання тих сенсорів, які мають лише три канали в області червоного краю, необхідні для визначення TCI, і не мають каналів для обчислення REP, як, наприклад, сенсор *Rapid Eye*.

Геомоніторинг наземного покриву на досліджуваних тестових ділянках у м. Київ проведено з 2009 р. Спектрометрування трав'яного покриву здійснєно дистанційно портативним спектрорадіометром FieldSpec3FR. Спектрометрування трав'яного покриву провєдено щорічно в одних і тих же точках. Дистанція між спектрорадіометром та об'єктом вимірювання була не менше ніж 1 м. Об'єктом вимірювання трав'яного покриву вибрано такі точки: газон стадіону "Динамо" ім. Валерія Лобановського, газон в Маріїнському парку і трав'яний покрив на набережній Дніпра у м. Київ. Розташування точок спостереження, в яких здійснювалося спектрометрування трав'яного покриву, наведено на рис. 3.3.

Рис. 3.3. Розташування точок спостереження на досліджуваних тестових ділянках, в яких здійснено спектрометрування трав'яного покриву спектрорадіометром FieldSpec3FR у 2009-2013 рр.: ***1*** – газон стадіону "Динамо"; ***2*** – газон Маріїнського парку; ***3*** – РП на набережній Дніпра

Використано дані спектрометрування на стадіоні “Динамо” і набережній Дніпра від 16.09.2009, 07.06.2010, 14.09.2010, 14.09.2011, 20.09.2012 і 07.06.2013 рр., а в Маріїнському парку – дані за той же період, крім даних від 07.06.2010 р.

За даними спектрометрування в кожній точці спостережень обчислено значення вегетаційних індексів REP за формулою (3.12) та TCI за формулою:

$$TCI = \frac{R(754) - R(708)}{R(708) - R(681)}. \qquad (3.14)$$

Результати обчислень вегетаційних індексів за даними спектрометрування РП в точках спостереження (рис. 3.3) в 2009-2013 рр. подано в табл. 3.26.

Згідно з даними обчислень, наведених в табл. 3.26, найнижчі середньоарифметичні значення обох індексів, як REP, так і TCI, характерні для спектрів відбиття трав’яного покриву на набережній: $\overline{REP}_{\min}$ = 719,08 нм, $\overline{TCI}_{\min}$ = 2,214, а найвищі – для газону стадіону “Динамо”: $\overline{REP}_{\max}$ = 721,51 нм, $\overline{TCI}_{\max}$ = 2,671. Різниця між максимальними і мінімальними середніми значеннями цих індексів становить для REP приблизно 2,5 нм, а для TCI – 0,46. Варто зазначити, що середньоквадратичні відхилення від середніх значень найменші для обох індексів спектрів відбиття трав’яного газону стадіону, а найбільші – для спектрів відбиття трави на набережній Дніпра. Це, ймовірно, зумовлено тим, що газон стадіону постійно підтримується в доброму стані і не зазнає шкідливого впливу довкілля. Натомість, трав’яний покрив газону на набережній постійно зазнає шкідливих викидів транспорту, який щодня рухається поряд.

За даними обчислень вегетаційних індексів спектрів, наведених на рис. 3.4, близькі значення REP і TCI характерні для спектрів відбиття в точках спектрометрування газонів стадіону – REP = 721,45 нм, TCI = 2,808 та Маріїнського парку – REP = 721,43 нм, TCI = 2,688. Зауважимо, що спектри відбиття в цих точках майже повністю збігаються в хвильовому діапазоні $\lambda \in$ 350, 850 нм. В той же час спектр відбиття трави на набережній відрізняється від

зазначених вище спектрів як значеннями коефіцієнтів відбиття, так і нижчими значеннями індексів: REP = 716,83 нм, TC = 1,490. Різниця між значеннями REP для зображених на рис. 3.4 спектрів перевищує 4 нм, а значення хлорофільного індексу TCI майже в 2 рази менше, ніж для спектрів відбиття газону стадіону, стан якого майже завжди стабільний. Це відображається в спектрах відбиття трав'яного покриву зменшенням середнього значення REP на 2,5 нм ("синій зсув") і хлорофільного індексу TCI на 0,39. Зауважимо, що значення дисперсії понад 2 нм вказують на широкий діапазон розсіювання значень REP для спектрів відбиття на набережній: 716 нм ≤ REP ≤ 723 нм. Аналогічну поведінку спостерігаємо і для значень хлорофільного індексу TCI.

Таблиця 3.26

Значення вегетаційних індексів REP і TCI для спектрів відбиття трав'яного покриву за даними спостережень в 2009-2012 рр.

№ з/п	Точки спостережень	Кількість спостережень	REP (нм)	TCI
1	Стадіон "Динамо"	5	721,51 ± 0,82	2,671 ± 0,215
2	Маріїнський парк	4	720,14 ± 1,57	2,332 ± 0,554
3	Набережна Дніпра	5	719,08 ± 2,45	2,214 ± 1,014

Зіставлення спектрів відбиття трав'яного покриву в діапазоні довжини хвиль $\lambda \in$ 350-1000 нм у трьох точках спостереження за даними спектрометричної зйомки від 07.06.2010 р. наведено на рис. 3.4. Зменшення значень індексів REP і TCI для спектрів відбиття трави на набережній Дніпра можуть свідчити про гірший [32, 33], ніж у Маріїнському парку, екологічний стан, на що і вказує "синій зсув" REP, який становить 4,6 нм. Одночасне зменшення REP і TCI в одній і тій же точці спостережень свідчить, що обидва індекси REP і TCI можуть слугувати індикаторами виявлення вегетаційних стресів трав'яного покриву, зумовлених несприятливими чинниками довкілля.

На рис. 3.5 показано взаємозв'язок між величинами REP і TCI для трав'яного покриву за 14 даними спектрометрування в трьох точках з 2009 до 2012 р.

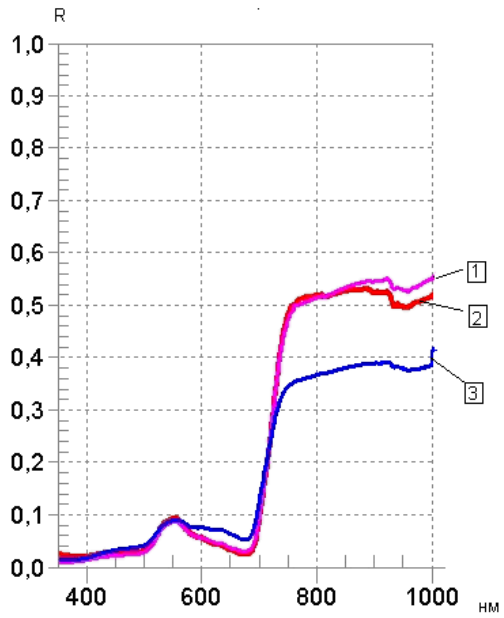


Рис. 3.4. Графіки зміни спектрометричних коефіцієнтів відбиття пшениці за межами родовища $R_1(\lambda)$ та над Глібовським газовим родовищем $R_2(\lambda)$ за даними спектрорадіометра FieldSpec3FR від 27.05.2010 р.

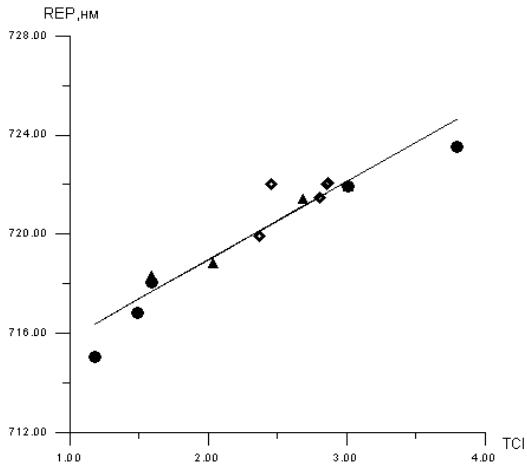


Рис. 3.5. Корелятивний зв'язок між величинами REP і TCI (R^2 = 0,45, r = 0,95, n = 14) в точках спостереження трав'яного покриву: ♦ – газон стадіону «Динамо" (n = 5); ▲ – газон Маріїнського парку (n = 4); ● – трав'яний покрив на набережній Дніпра (n = 5)

Восени 2010 р. стан газону на набережній Дніпра був найгірший, на що вказують найнижчі за весь період спостережень (рис. 3.5) значення обох вегетаційних індексів за даними спектрометрування від 14.09.2010 р.:
REP = 715,05 нм, TCI = 1,117.

На рис. 3.5 видно, що між значеннями REP і TCI існує сильна кореляція із коефіцієнтом r = 0,95. Значення вегетаційних індексів на графіку змінюються від REP_{min} = 715,05 нм, TCI_{min} = 1,179 за даними спектрометрування 14.09.2010 р. до максимальних REP_{max} = 723,5 нм, TCI_{max} = 3,799 за даними спектрометрування 20.09.2012 р. Діапазон зміни REP становить 8,45 нм, а TCI – 2,62. Як максимальні, так і мінімальні значення індексів зафіксовано для спектрів відбиття трав'яного покриву на набережній Дніпра. Високі значення обох вегетаційних індексів для спектрів відбиття трав'яного покриву на набережній восени 2012 р. можна пояснити хорошим станом трави в зв'язку із тривалою теплою дощовою погодою та обмеженням автомобільного руху через ремонт дороги.

Крім того, тепла дощова погода стимулювала ріст трави як на набережній, так і в Маріїнському парку, де теж спостерігались високі значення індексів REP = 721,94 нм, TCI = 3,01, які перевищують середньоарифметичні значення $\overline{REP}$ = 720,24 нм, $\overline{TCI}$ = 2,41 за весь період спостережень. Згідно з даними табл. 3.26, середні значення вегетаційних індексів за весь період спостережень трав'яного покриву в трьох точках близькі до середніх значень цих індексів за цей же період спостережень трав'яного покриву в Маріїнському парку (табл. 3.26). Значення коефіцієнта кореляції, близьке до 1, вказує на майже лінійну залежність між індексами REP і TCI для спектрів відбиття трав'яного покриву [38]. Модель лінійної регресії залежності REP від TCI для TCI $\in$ 1,18, 3,80 має такий вигляд:

$$y(x) = 712,66 + 3,15x \text{ (нм)}, \qquad (3.15)$$

де x – значення TCI, обчислене за формулою (3.14); $y(x)$ = REP (TCI).

Коефіцієнт детермінації моделі r^2 = 0,90, а середньоквадратичне відхилення R^2 = 0,45 для n = 14. Згідно з рівнянням (3.15), прогнозовані значення REP і TCI змінюються від 716,37 нм до 724,63 нм для 1,18 ≤ TCI ≤ 3,80.

Побудована модель може слугувати для прогнозування зсувів REP щодо його середнього значення за величинами індексу TCI з області визначення. Коефіцієнт узгодженості (Index of agreement) *d* моделі (3.15) за даними вимірювань обчислено за формулою [39, 40]:

$$d = -\frac{\sum_{i=}^{n} y_i - y(x_i))^2}{\sum_{i=}^{n} y(x_i) - \bar{y}\ | + y_i - \bar{y}\ |)^2} =),98, \qquad (3.16)$$

де y_i – значення REP_i, обчислені для спектрів відбиття трав'яного покриву за формулою (3.13); x_i – значення TCI_i, вирахувані за формулами (3.14); $y(x_i)$ – значення REP_i, обчислені за формулою (3.15) відповідно для x_i = TCI_i, i = $\overline{1,14}$, $\bar{y} = \overline{REP}$; n = 14 – кількість даних вимірювань.

Значення d, близьке до 1, свідчить про добру узгодженість прогнозної моделі із даними вимірювань [39, 40].

Для ***верифікації*** прогнозної моделі лінійної регресії (3.15) використано дані спектрометрування трав'яного покриву від 06 червня 2013 р. у тих же точках. За даними спектрометрування обчислено значення REP і TCI в постійних точках геомоніторингу. В табл. 3.27 подано значення величин REP_c і TCI_c, обчислені за формулами (3.13) і (3.14), та прогнозовані значення $REP_{пр.}$ TCI_c , одержані за формулою (3.15).

Таблиця 3.27

Зіставлення прогнозованих значень $REP_{пр}$ за формулою (3.15) та обчислених за даними спектрометрування від 06.06.2013 р.

№ з/п	Точки спостережень	REP_c (нм)	TCI_c	$REP_{пр.}$ (нм)	Δ REP = RE_c – $REP_{пр.}$ (нм)
1	Газон стадіону "Динамо"	719,77	2,231	719,69	0,09
2	Газон Маріїнського парку	718,98	1,843	718,46	0,52
3	Трав'яний покрив набережної Дніпра	714,11	1,090	716,09	-1,98

Як свідчать дані обчислень, наведені в табл. 3.27, прогнозовані за формулою (3.15) значення $REP_{пр.}$ добре узгоджуються із даними спостережень в двох точках: на газонах стадіону ”Динамо” і Маріїнського парку. Найбільшу різницю в значеннях вегетаційних індексів REP для трав’яного покриву на набережній Дніпра майже 2 нм можна пояснити тим, що рівняння регресії (3.15) визначене для значень TCI ≥ 1,18, а значення TCI_c = 1,09 знаходиться за межею області визначення прогнозної моделі. Встановлення взаємозв’язку між величинами REP і TCI та побудована прогнозна модель лінійної регресії свідчать про потенційну можливість індексу TCI слугувати індикатором вегетаційного стресу, а також про доцільність подальшого його дослідження для вивчення особливостей відбиття РП за космознімками тих сенсорів, які мають в області червоного краю три відповідних канали для визначення TCI, як, наприклад, КА *RapidEye* [41].

3.4. Вибір параметрів орбітальної системи КА, яка мінімізує розриви спостереження на тестових ділянках (полігонах) ДЗЗ

Сучасні ІЧ- і НВЧ-радіометричні прилади, встановлені на КА, мають невелику масу, дозволяють отримувати дані спостережень полів власного випромінювання ділянок земних покривів, акваторій, атмосфери. На відміну від приладів оптичного діапазону, в яких приймається відбите сонячне випромінювання, вони допускають цілодобовий моніторинг ділянок як на освітленій, так і на тіньовий поверхнях Землі. Принципова можливість апаратури здійснювати спостереження зональної поверхні незалежно від її освітленості дозволяє істотно скоротити, при виборі відповідних параметрів робочих орбіт угруповання, розриви в спостереженнях або кількість КА в складі угруповання. Інша можливість скорочення розривів у спостереженнях полягає в тому, що, зберігши суцільний огляд кульового пояса, в якому розташована контрольована зона, і допускаючи утворення лакун (пропусків, щілин) на широтах ближче до екватора, можна істотно зменшити періодичність зонального огляду. Під суцільним оглядом деякої території (зони) земної поверхні розуміють покриття її смугами огляду в покритті. Зсув смуг огляду

внаслідок добового обертання Землі в кутовому вимірі на будь-якій геоцентричній широті однаковий, проте в лінійних метричних одиницях міжвиткова відстань збільшується при наближенні до екваторіальної широти і досягає максимального значення на екваторі. Можливість реалізації розглянутих вище передумов в поєднанні з невеликою масою бортової ІЧ- і НВЧ-апаратури дозволить реалізувати геомоніторингову систему зонального спостереження у вигляді мікросупутникового угруповання. Вже на ранній стадії розгляду проектних варіантів важливо правильно оцінити можливості системи здійснювати моніторинг з допустимими для вирішення завдання характеристиками покриття спостережуваної поверхні. Для цього необхідно провести попередній розрахунок структури і параметрів орбіт угруповання КА, висунути мотивовані технічні вимоги до приладів корисного навантаження КА, зокрема до допустимих кутів огляду апаратури. До таких можуть бути також віднесені і КА з радіолокаційною апаратурою, однак їх реалізація можлива в класі міні або малих КА. Всі перераховані вище передумови до раціональної побудови орбітальної системи геомоніторингу території України були реалізовані при проведенні синтезу угруповання.

В даний час теоретична і практична розробки методів розрахунку оптимальної структури та орбіт угруповань КА для огляду певної території земної поверхні України не достатньо розроблена. Найбільш обґрунтованими для цілодобового регіонального огляду Землі є орбітальні угруповання, побудовані за дельта-схемами [42], кінематично правильними системами штучних супутників Землі (ШСЗ) [43], а також угруповання на полярних орбітах [44]. В даний час знаходять структури угруповань та параметри їх незбурених орбіт, які перевершують згадані вище за різними критеріями огляду Землі [45, 46]. Зокрема, для вирішення завдань синтезу угруповань і апаратурних комплексів використовують методи пошукового проектування, найбільш розвиненими з яких є різні модифікації генетичних алгоритмів [46, 47]. Однак відсутність обґрунтування збіжності методів найчастіше призводить

до знаходження рішення за принципом “краще попереднього”, що притаманне всім алгоритмам пошукового проектування.

Розглянуто поняття критеріального покриття (спостереження, огляду). Покриття земної поверхні – це та частина Землі, яка може бути одноразово переглянута або проглядається деякий час бортовою апаратурою КА. Можливість покриття певних районів є ключовим елементом проектування угруповань КА. Виділяють два важливих елементи при оцінці покриття. Миттєве поле зору (миттєві зони огляду) – площа, яку можна оглянути приладом в будь-який довільний момент, – перший елемент. На низьких навколоземних орбітах супутник рухається швидко, тому другим важливим елементом є швидкість покриття – швидкість, з якою нова поверхня потрапляє в поле зору при русі супутника. Аналітичні моделі високого ступеня деталізації покриття не дозволяють простим способом простежити: частоту перегляду точки, де знаходяться лакуни в покритті; можливість огляду цілей при різних кутах Сонця; отримати інтегральні показники оцінки покриття; крім того, вони не можуть визначати статистичні характеристики покриття.

Обчислення статистичних характеристик покриття передбачає створення по всій поверхні території України рівномірної модельної сітки з кроком 0,50 (55,6) км, що складається з точкових об'єктів спостережень; шляхом розв’язання рівнянь моделюються орбітальні рухи угруповання КА, визначаються траси на обертовому еліпсоїді Землі і по заданих кутах огляду бортової апаратури відслідковуються характеристики перегляду для кожної точки в сітці. Збір статистичних даних по кожному варіанту угруповання з подальшим обчисленням критерію покриття проводився протягом 48 діб модельного часу. Критерій оцінки ефективності орбітального угруповання для вирішення моніторингових завдань на території України формулюється як задача мінімізації максимального часу повторного огляду всіх 216 точкових об'єктів спостереження на території України min (F), де F = (max (RT)) – максимальний час повторного огляду. Час повторного огляду (Revisit time) – це показник, що часто використовується для оцінки орбітальних угруповань, які

не досягають безперервного покриття області на поверхні Землі. Час повторного огляду – це час, протягом якого дане розташування на Землі не спостерігається орбітальною системою КА. Кращою вважається такий варіант угруповання, для якого значення критерію max RT найменше.

При проектуванні угруповання, крім забезпечення найкращого покриття зони, слід враховувати й інші вимоги, наприклад експлуатацію КА, масштаби реєстрованої інформації, фінансові обмеження на кількість КА і їх обслуговування. Такі вимоги висувають додаткові обмеження до структури та параметрів руху КА. Синтез проводимо з урахуванням наступних обмежень: орбіти всіх КА кругові – вимога отримання рівномасштабової інформації; орбіти квазісинхронного спостереження впорядковані в часі; КА в угрупованні мають одну висоту H та нахил i – мікросупутники в угрупованні, як правило, мають одну висоту орбіт і нахилів, тому що характеристики дрейфу орбіт істотно залежать від цих параметрів. КА на орбітах з різними висотами або нахилами дрейфують один відносно одного, що призводить до зміни їх взаємної орієнтації з плином часу. Тому КА з різною висотою і нахилом не можуть добре працювати як угруповання тривалий час. Їх орбіти прецесують з різною швидкістю, і набір площин, що має певну геометричну структуру, протягом часу буде змінюватися. На підтримку такого угруповання витрачається великий запас енергії, і таку тактику не слід застосовувати до мікросупутників: діапазон висоти H = 650, 750 км; кількість угруповання КА N = 2 – фінансові обмеження.

Синтез проводився методом пошукового проектування на комп'ютерних реалізаціях розглянутих моделей і обмежень відповідно до постановки завдання синтезу. За початкове наближення була обрана схема компонування КА [42] з довготою висхідного вузла $\Omega = 0^0$ і аргументом широти $u = 0^0$ для КА-1. Орбітальна система загальною чисельністю N КА складається з N_1 груп по N_2 КА в кожній групі так, що $N = N_1N_2$. У кожній групі КА рухаються за єдиною для групи трасою. Для розглянутого прикладу $N_1 = 2$, $N_2 = 1$, $N = 2$. Подальше нарощування угруповання з метою скорочення розривів у спостереженнях

може проводитися за наступною схемою. Зростання кількості апаратів, що рухаються по одних орбітах, зменшує ширину смуги огляду, а зростання кількості площин орбіт дозволяє збільшити чисельність КА, що рухаються за єдиною трасою, і скоротити розриви в спостереженнях. За такою схемою компонування кількість КА у всіх орбітальних площинах має бути однаковим.

Представлена модель двох супутникових орбітальних угрупувань суцільного цілодобового зонального огляду України для геомоніторингу ГС. Показано взаємне розташування КА і площин орбіт. Параметри кругових орбіт: нахил $i = 87{,}633^0$, радіус $r = 7099{,}137$ км (висота $H = 721$ км), період обертання $P = 5952{,}77$ с $\approx 1{,}65355$ ч. Параметри КА-1: довгота висхідного вузла $\Omega = 0^0$, аргумент широти $u = 0^0$; параметри КА-2: $\Omega = 89{,}3^0$, $u = 270^0$. Максимальний час повторного огляду всіх об'єктів, розташованих на території України, становить 2,7 доби. Ізомаршрутні траси двох супутникових космічних систем забезпечують прискорений огляд території України. ШСЗ-2 слідує по трасі ШСЗ-1, що скорочує періодичність огляду України в порівнянні з односупутниковою системою приблизно в 2 рази. Застосовано також принцип раціонального "стикування" групи "денних" смуг огляду з групою "нічних" смуг огляду. Ділянки трас, утворені висхідними (денними) ділянками орбіт (мають нахил управо) і тих, що сходять (нічними) ділянками (нахил уліво), зменшують періодичність огляду додатково ще в 2 рази при використанні апаратури цілодобового огляду. У режимі трасової зйомки суцільне покриття території України проводиться з використанням апаратури цілодобового огляду смугами огляду $b = 207{,}8$ км (кут бортового огляду $\gamma = 8{,}2^0$) [48].

Висновки до третього розділу

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

2. Обґрунтовано методику експертних оцінок для моделювання та визначення інформаційно-технічних характеристик наземних завіркових

полігонів ДЗЗ. На цій основі вибрано шість полігонів для верифікації результатів КГМ: Київський (Міський) та Київський (Агрообласний), Шацький, Вінницький, Миколаївський та Кримський (Тарханкут). У подальшому, з урахуванням отриманого досвіду, передбачається продовжити спектрометричні дослідження інших завіркових полігонів ДЗЗ України з метою їх оцінки і використання для наземної верифікації КГМ.

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 суттєво 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. Це має суттєве значення при попіксельному обчисленні значень REP для побудови REP-зображень за даними космознімання.

4. Встановлення взаємозв’язку між величинами REP і TCI на підставі лінійної регресії свідчить про потенційну можливість вегетаційного індексу TCI слугувати індикатором вегетаційного стресу. Доцільне подальше 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, *Rapid Eye*.

5. Результати синтезу параметрів орбіт раціонального космічного угруповання КА можуть бути використані для створення мікросупутникових угруповань ДЗЗ території України для геомоніторингу ГС.

6. Встановлено що час повторного огляду всіх об'єктів, розташованих на території України, становить близько 2,7 доби, що скорочує періодичність огляду України в порівнянні з односупутниковою системою приблизно в 2 рази.

Список використаних джерел до третього розділу

1. Изменение земных систем в Восточной Европе: Лялько В.И. (отв. ред.). Киев: Фолиант, 2010. 582 с.

2. Earth Systems Change over Eastern Europe: Coeditors P., Lyalko V. (Eds.). Kiev: Akademperiodyka, 2012. 488 p. ISBN 978-966-360-195-3.

3. Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі: Лялько В.І. та Попов М.О. (ред.). Київ: Наук. думка, 2006. 358 с.

4. Лялько В.И., Попов М.А. Полигоны дистанционного зондирования Земли в Украине как элемент глобальной системы GEOSS GMES. *Косм. наука і технологія*. 2008. Т. 14, № 2. С. 3-12.

5. Попов М.О., Цимбал Т.В. Правила та процедура сертифікації методик використання даних дистанційного зондування Землі при вирішенні тематичних задач. *Косм. наука і технологія*. 2004. Т. 10, № 4. С. 104-112.

6. ДСТУ 2462-1994. Сертифікація. Основні поняття. Терміни та визначення. Київ, 1994.

7. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. Москва: Радио и связь, 1993. 278 с.

8. Батьковский А.М., Коробов С.П., Хрусталев Е.Ю. Об одном подходе к оценке вариантов реструктуризации оборонно-промышленного комплекса. *Экономика и мат. методы*. 2004. Т. 40, № 1. С. 50-68.

9. Федоровский А.Д., Якимчук В.Г., Бондар Е.Н., Козлов З.В. Оценка эффективности космических систем ДЗЗ на основе метода анализа иерархий. *Косм. наука і технология*. 2005. Т. 11, № 3/4. С. 75-60.

10. 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.

11. 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.

12. Лялько В.І., Сахацький О.І., Шпортюк З.М., Сибірцева О.М. Використання індексів червоного краю та водних індексів за гіперспектральними даними EO-1 “Hyperion” для класифікації земного покриву. *Косм. наука і технологія.* 2008. Т. 14, № 3. С. 55-68.

13. 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.

14. Hilker T., Lyapustin A., Hall F.G. Remote Sensing of Environment An assessment of photosynthetic light use efficiency from space: Modeling the atmospheric and directional impacts on PRI reflectance (США, Канада). *RSE*. 2009. Vol. 113. P. 2463-2475.

15. Саати Т., Аернс К. Аналитическое планирование. Москва: Радио и связь, 1991. 186 с.

16. **Дугін С.С.** Оцінка і вибір полігонів для наземної завірки інформації космічного геомоніторингу. *Доп. НАН України.* 2014. № 5. С. 87-95.

17. Лялько В.І., Шпортюк З.М., Сахацький О.І., Сибірцева О.М. Класифікація земного покриву Карпат з використанням наземного хлорофільного індексу та позиції червоного краю за даними відеоспектрометра MERIS. *Косм. наука і технологія*. 2006. Т. 12, № 5/6. С. 10-14.

18. Лялько В.І., Шпортюк З.М., Сахацький О.І., Сибірцева О.М. Коригування впливу атмосфери на гіперспектральні дані сенсора EO-1 “Hyperion“ при обчисленні позиції червоного краю. *Косм. наука і технологія*. 2009. Т. 15, № 3. С. 32-41.

19. Сахацький О.І., Сибірцева О.М. Шпортюк З.М. Формування зображень на основі розрахунків вегетаційних індексів червоного краю за даними ENVISAT MERIS. *V1 Укр. конф. по косм. исслед.*: Тез. докл. (Евпатория, 3-10 сент. 2006). Евпатория, 2006. С. 124.

20. Baret F., Jacquemoud S., Guyot G., and Leprieur C. Modeled Analysis of the Biophysical Nature of Spectral Shifts and Comparison with Information Content of Broad Bands. *Remote Sens. Environ.* 1992. Vol. 41, iss. 2-3. P. 133-142.

21. Buschmann C. Fernerkundung von Pflanzen. *Naturwissenschaften*. 1993. Bd. 80. S. 439-453.

22. Buschmann C., Nagel E. Reflexionsspektren von Blatern und Nadeln als Basis fur die physiologische Beurteilung von Baumschaden. PEF-Report Nr. 90. Karlsruhe: Kernforschungszentrum, 1992. 165 s.

23. Buschmann C. and Nagel E. In vivo spectroscopy and internal optics of leaves as basis for the remote sensing of vegetation. *Int. J. Remote Sens*. 1993. Vol. 14. P. 711-722.

24. Collins W., Chang S.-H., Raines G. Airborne Biogeophysical Mapping of Hidden Mineral Deposits. *Econ. Geol*. 1983. Vol. 4, № 78. P. 737-749.

25. Horler D.N.H., Dockray M. and Barber J. The red edge of plant leaf reflectance. *Int. J. Remote Sens*. 1983. Vol. 4. P. 273-288.

26. Pu R., Gong P., Biging G., Larrieu M.R. Extraction of Red Edge Optical Parameters From Hyperion Data for Estimation of Forest Leaf Area Index. *IEEE Trans. Geosc. and Remote Sens*. 2003. Vol. 41, № 4. P. 916-921.

27. Rock B.N., Hoshizaki T. and Miller J.R. Comparison of the in situ and airborne spectral measurements of the blue shift associated with forest decline. *Remote Sens. Environ*. 1988. Vol. 24. P. 109-127.

28. Soudani K., Francois C., le Maire G., Le Dantec V., Dufrene E. Comparative analysis of IKONOS, SPOT, and ETM+ data for leaf area index estimation in temperate coniferous and deciduous forest stands. *Remote Sens. Environ*. 2006. Vol. 102. P. 161-175.

29. Zarco-Tejada P.J., Miller J.R. Land cover mapping of BOREAS using red edge spectral parameters from CASI imagery. *J. Geophys. Res*. 1999. Vol. 104 (D22). P. 27921-27933.

30. ASD FieldSpec3FR. User Manual ASD Document 600540 Rev. G. USA, 2007. 96 p.

31. Jones D.A., Hansen A.I., Bly K. Monitoring land use and cover around parks: A conceptual approach. *Remote Sens*. *Environ*. 2009. Vol. 113. P. 1346-1356.

32. Jago R.A., Curran P.J. The effect of land contamination on the relationship between the red edge and chlorophyll concentration of a grassland canopy. *RSS'95: Remote Sens. in Action*. Nottingham: Rem. Sens. Soc., 1995. P. 442-449.

33. Jago R.A., Curran P.J. Estimating canopy chlorophyll concentration from field and airborne spectra to infer levels of land contamination. *RSS'97: Observations and Interactions*. Redding: Rem. Sens. Soc., 1997. P. 274-279.

34. Clevers J.G.P.W., Kooistra L., Salas E.A.L. Study of hevy metal contamination in river flodplains using the red-edge position in spectroscopic data. *Int. J. Remote Sens*. 2004. Vol. 25. P. 1-13.

35. 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.

36. Dash J., Curran P.J. The MERIS terrestrial chlorophyll index. *Int. J. Remote Sens*. 2004. Vol. 25. P. 5403-5413.

37. Лялько В.І., Шпортюк З.М., Сибірцева О.М., **Дугін С.С.**, Воробйов А.І. Дослідження змін вегетаційних індексів для пшениці над газовим родовищем (підземним газосховищем) за даними гіперспектральної зйомки. *Косм. наука і технологія*. 2012. Т. 18, № 2. С. 15-19.

38. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. Москва: Высшая шк., 1998. 480 с.

39. Willmot C.J. On the validation of models. *Phys. Geography*. 1981. Vol. 2. № 2. P. 184-194.

40. Krause P., Boyle D.P, Båse F. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*. 2005. Vol. 5. P. 89-97.

41. 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.

42. Walker J.G. Some Circular Orbit Patterns Providing Continuous Whole-Earth Coverage. *J. British Interplane-tary Soc*. 1971. Vol. 24. P. 369-384.

43. Можаев Г.В. Синтез орбитальных структур спутниковых систем. Москва: Машиностроение, 1989. 304 с.

44. Adams W.S., Rider L. Circular Polar Constellations Providing Continuous Single or Multiple Coverage Above a Specified Latitude. *J. Astronaut Sci*. 1987. Vol. 35, № 2. P. 155-192.

45. Саульский В.К. Многократный непрерывный обзор Земли на основе многоспутниковых систем с линейной структурой. *Исслед. Земли из космоса*. 2009. № 2. С. 164-175.

46. Crossley W.A., Williams E.A. Simulated Annealing and Genetic Algorithm Approaches for Discontinuos Cover-age. *Satellite Constellation Design Engineering Optimization*. 2000. Vol. 32. P. 353-371.

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

48. Артюшенко М.В., **Дугін С.С.** Моделирование и синтез орбитальной группировки космических аппаратов зонального наблюдения территории Украины. *Косм. наука і технологія*. 2011. Т. 17, № 5. С. 50-57.

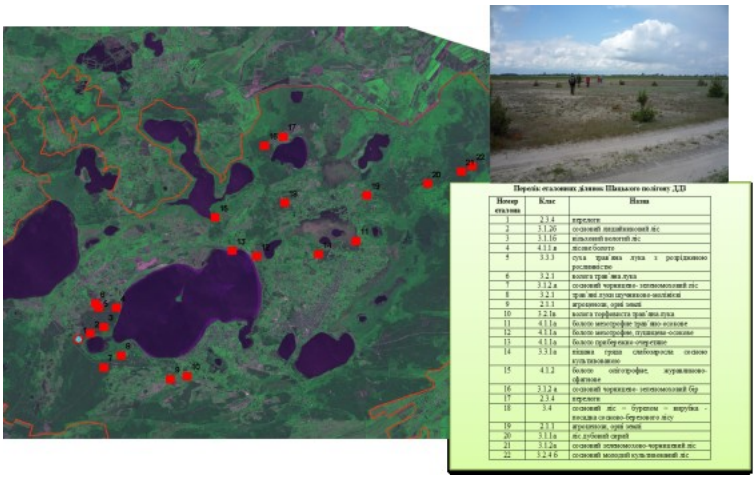
РОЗДІЛ 4

АПРОБАЦІЯ ТА ВЕРИФІКАЦІЯ ТЕМАТИЧНИХ ЗАДАЧ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ НА ВИБРАНИХ ПОЛІГОНАХ ДЗЗ

4.1. Наземні дослідження за допомогою польового спектрорадіометра ASD FieldSpec3FR та створення бази спектрів відбиття земної поверхні на основі адаптованої європейської системи класифікації земних покривів CORINE Land Cover (CLC) (Шацький полігон ДЗЗ) – Полісся

На Шацькому полігоні було проведено вимірювання земних покривів для подальшої обробки та відпрацювання методик верифікації та калібрування даних супутникового спостереження Землі. Європейська система класифікації земних покривів CORINE Land Cover (CLC) [1-6] була адаптована до умов району досліджень і екосистем Поліської зони. В результаті було уточнено специфікацію, доопрацьовано та описано класи, які відповідають вказаній класифікаційній системі. Встановлено основні дешифрувальні ознаки та критерії належності покривних елементів ландшафту (рис 4.1) до відповідного класу та обґрунтовано вибір характерних для Шацького полігону ДЗЗ еталонних ділянок.

Перший клас за номенклатурою CLC в межах Шацького полігону представлено штучно утвореними поверхнями, тобто покривами, що виникли внаслідок техногенної діяльності: різні типи житлової забудови, локально розташовані об'єкти соціального і муніципального призначення, невеликі промислові об’єкти, сільськогосподарські двори, СТО, АЗС, гаражі, дороги і пов’язані з ними землі, смітники, невеликі кар’єри з видобування глини і піску, будівельні майданчики, постіндустріальні території, рекреаційні зони, бази відпочинку, кемпінги, стадіони. Для цих категорій еталонні ділянки не визначались, тому що в межах ШНПП поки що основна увага була зосереджена на вивченні природної складової земних покривів, тобто на об’єктах з другого по п’ятий класи системи CLC [7, 8].



Перелік еталонних ділянок Шацького полігону ДЗЗ

Номер еталона	Клас	Назва
1	2.3.4	перелоги
2	3.1.2б	сосновий лишайниковий лес
3	3.1.1б	мальовничий пологий лес
4	4.1.1 а	лісне болото
5	3.3.3	суха трав'яна лука з розріджеиною рослинністю
6	3.2.1	волога трав'яна лука
7	3.1.2 а	сосновий чорницево- лишаиниковий лес
8	3.2.1	трав'яна луки щучиково-вологіеві
9	2.5.1	агроценози, орні землі
10	3.2.1а	вологі торфянисто трав'яна луки
11	4.1.1а	болото мезотрофне трав'яно-осокове
12	4.1.1а	болото мезотрофне, тупаиеиня-осокове
13	4.1.1а	болото прибережно- очеретяиеиє
14	3.3.1а	вологи луки слабокарсиє осоково культиоваиеиє
15	4.1.2	болото оліготрофне, журавлиниеово-сфагнове
16	3.1.2 а	сосновий чорницево- лишаиниковий бір
17	2.3.4	перелоги
18	3.4	сосновий лес - бурьяиеи - вирубка - посадка сосново-березового лесу
19	2.5.1	агроценози, орні землі
20	3.1.1а	лес дубовий сирий
21	3.1.2а	сосновий лишаиниково-чорницевий лес
22	3.2.4 б	сосновий молодий культививаиий лес

Рис. 4.1. Адаптована до умов України європейська система класифікації земних покривів CORINE Land Cover (Шацький полігон ДЗЗ)

Електронна база спектрально-часових характеристик. БД — це засіб збирання й впорядкування даних, тобто впорядкований набір логічно взаємопов'язаних даних, що використовується спільно та призначений для задоволення інформаційних потреб користувачів. У технічному розумінні включно й система керування БД (СКБД). Головним завданням БД є гарантоване збереження значних обсягів інформації (так звані записи даних) та надання доступу до неї користувачеві або ж прикладній програмі.

БД складається з двох частин: збереженої інформації та системи управління нею. З метою забезпечення ефективності доступу записи даних організовані як множина фактів (елемент даних).

БД починаються як список у текстовому редакторі або електронній таблиці. У разі збільшення розміру списку в даних починають з’являтися зайві або невідповідні елементи і тоді стає важко розуміти дані у формі списку, а способи пошуку та витягування наборів даних для перегляду є обмеженими. Коли ці проблеми починають з’являтися, слід перенести дані до БД, створеної за допомогою системи керування базами даних СКБД, наприклад Office Access.

При розв’язанні прикладних задач, пов'язаних з обробкою інформації будь-якого походження, робота дослідника - аналітика даних - не обмежується тільки вибором методу обробки та застосуванням програм, що його реалізують. Досить трудомісткими є різного роду дії, пов'язані з підготовкою початкових даних, інтерпретація результатів, що отримуються, тощо.

Для створення системи бази даних (СБД) застосовано комплексний програмний продукт Microsoft Office, до складу якого входить пакет СУБД Office Access.

Для накопичення та довгострокового зберігання систематизованого фонду спектрометричної інформації застосовується інформаційна БД з каталогом, яка включає каталог описової інформації та таблиці характеристик спектральних яскравостей відбитої радіації.

Слід зауважити, що при створенні СБД більш сталий характер надається створюваним таблицям, а різні допоміжні інтерфейси в процесі роботи з даним пакетом можуть змінюватися, приймаючи більш привабливий вигляд (рис. 4.2).

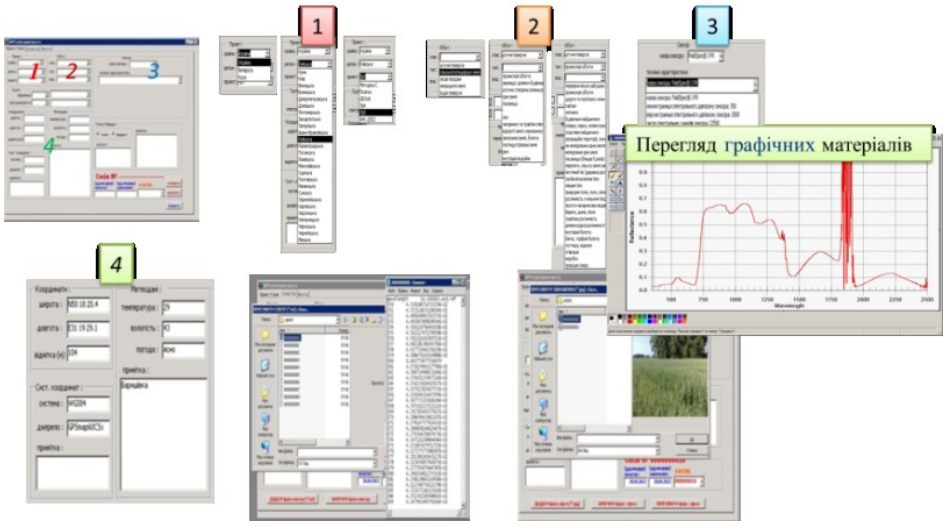


Рис. 4.2. Створення бази даних спектрів відбиття земної поверхні: 1. країна, проект, регіон; 2. клас, тип, вид; 3. характеристики сенсора; 4. координати точки вимірювання, метеодані (за умови, що дослідження проводилось не в камеральних умовах), дати проведення зйомки

Пакет Access, за допомогою якого створюється СБД спектрометричних даних, забезпечує можливість збереження даних та керуючих програм в форматі файлу (.mbd), який за необхідністю в подальшому може бути переконвертований в формати інших більш потужних СУБД. Для цього існують спеціальні допоміжні програми-конвертори, а розробники пакету Microsoft Office, до якого входить Access, забезпечили таку можливість [9].

4.2. Виявлення особливостей вегетаційних індексів спектрів відбиття різних сортів посівів озимої пшениці в умовах Степової зони України (Миколаївський полігон ДЗЗ) – Лісостеп

Дослідження спектрів відбиття рослинності за допомогою високоточної апаратури активно проводиться вже понад три десятиліття. Можна виокремити принаймні три напрями використання вимірювань спектральних характеристик РП. Насамперед це пошук неруйнівних методів вивчення рослин, суть яких полягає у віднайденні кореляційних залежностей між спектральними коефіцієнтами яскравості (чи розрахованими на їх основі вегетаційними індексами) та окремими біохімічними компонентами рослинних органів (пігментами, вмістом азоту чи води). Накопичений досвід у дистанційному виявленні хлорофілів, каротиноїдів та антоціанів у листках рослин, обговорення успіхів і проблем їх кількісної оцінки методами спектрометрії високої розрізненності узагальнено в огляді [10].

Ще одне завдання, яке намагаються вирішити за допомогою високоточних безконтактних дистанційних вимірювань, – оцінка можливості автоматизованого виділення окремих складових частин зі сукупності різних родів рослин, що ростуть поряд. Таку спробу здійснено вченими з університету м. Кассель (Німеччина) з метою встановлення пропорції бобових (конюшини та люцерни) у бобово-злакових (з райграсом) травосумішах, вирощених у вегетаційних умовах. У цьому експерименті застосовувались методи регресії та вегетаційні індекси SR, NDVI, EVI, REP, розраховані зі спектрів відбиття різних варіантів травостоїв, отриманих спектрометром *FieldSpec Pro JR* [11].

Третій напрям використання наземних гіперспектральних даних відбиття рослинності – зіставлення їх з інформацією, отриманою зі сенсорів, встановлених на борту КА. Застосування методики й техніки високоточного спектрометрування дозволяє перевірити, наскільки взаємоузгоджуються індекси, розраховані на основі гіперспектральних даних наземного оптичного ДЗЗ, та аналогічні індекси, обчислені на підставі даних відбиття з порівняно ширших каналів космічних сенсорів. Серед них варто виділити вегетаційні

індекси в області червоного краю 660-780 нм, за допомогою яких можна неруйнівними методами оцінити різноманітні параметри і культурної, і природної рослинності. Роботи в цьому напрямі проведені як для КА *RapidEye* [12], так і для спеціально сконструйованих з метою дослідження рослинності й охорони довкілля мікросупутників *VENμS* та *Sentinel-2*, запуск яких відбувся у 2013 р. [13].

Свого часу методиці визначення REP за даними космознімання не приділялося належної уваги через відсутність на супутниках відповідних спектрометрів з достатньою кількістю каналів у зоні червоного краю. Та з 2010 р. в Україні поширюється інформація з німецького супутникового угруповання *Rapid Eye*, котре оснащене 5-канальними багатоспектральними оптико-електронними системами, що дозволяють вперше серед комерційних супутників отримувати знімки земної поверхні каналом червоного краю (Red Edge) 690–730 нм. Тому особливої актуальності набувають наземні підсупутникові дослідження спектральних особливостей рослинних угруповань з метою їх подальшого зіставлення з інформацією, отриманою шляхом обробки КЗ.

На жаль, в науково-дослідних установах України до 2009 р. було відсутнє сучасне високотехнологічне обладнання для проведення польових вимірювань спектральних характеристик об’єктів у широкому діапазоні довжин хвиль з необхідною спектральною розрізненністю. Детальне дослідження спектрів відбиття рослин виконано вченими під керівництвом проф. С.М. Кочубей на спеціально сконструйованих для цього приладах з різними діапазонами реєстрації та кроками відбору інформації [14, 15]. Було створено кілька варіантів експериментальних зразків спектрометричного апаратурно-програмного комплексу для дистанційного визначення вмісту хлорофілу у рослинності в натуральних умовах та проведено їх випробування на дослідних ділянках ІФРГ НАН України та на дослідних полях цього інституту в Васильківському районі Київської області [16].

З появою першого в Україні цифрового спектрорадіометра ASD FieldSpec3FR з’явилась можливість здійснювати спектрометрування наземного покриву в польових умовах для розв’язання різноманітних прикладних задач. Дані вимірювань спектральних характеристик РП використано як еталонні для зіставлення з даними космознімання сенсора *Hyperion* [17] та для визначення впливу просочування природного газу на спектральні характеристики пшениці над Глібовським газовим родовищем [18].

Експеримент зі спектрометрування сільськогосподарських культур було здійснено 16 червня 2010 р. польовим спектрометром ASD FieldSpec3FR у Степовій зоні України (Миколаївський полігон) на дрібноділянкових посівах демонстраційного полігону елітного насіннєвого господарства «Золотий колос» поблизу м. Миколаїв (рис. 4.3).

Рис. 4.3. Розташування поля (світлий прямокутник між точками 194 та 291), де знаходився демонстраційний полігон елітного насіннєвого господарства «Золотий колос», на якому 16.06.2010 р. здійснено спектрометрування сільськогосподарських культур

На зазначену дату тут на ділянках довжиною 40 м та шириною 1,5; 3 та 6 м вирощувались різні сорти 14 сільськогосподарських культур, характерних для Степової зони України. Об’єктом досліджень були посіви різновидів ОП

м'якої або звичайної (Triticum aestivum L.) та ОП твердої (Triticum durum Desf.), які під час спектрометрування перебували у фазі молочно-воскової стиглості.

16 червня 2010 р. о 7-й годині ранку та в післяобідню пору було ясно, сухо й сонячно, лише опівдні спостерігалася мінлива хмарність. Температура повітря вранці сягала 30˚С, вдень підвищилась до 36˚С. Спектрометрування здійснено від 12-ї до 14-ї години.

У дослідженні використано три індекси червоного краю: позицію червоного краю REP (3.12) [19], мерісівський наземний хлорофільний індекс MTCI [20], що позначено як TCI (3.14), та модифікований нормалізований різницевий індекс червоного краю $NDVI_{705}$ (4.1) [21], які характеризують фотосинтетичний потенціал рослин (табл. 4.1).

$$NDVI_{705} = \frac{R(750) - R(705)}{R(750) + R(705)}. \qquad (4.1)$$

Отримані дані було статистично оброблено відповідно до виділених чотирьох груп різновидів ОП з врахуванням кількості сортів кожного різновиду (табл. 4.2).

За даними табл. 4.2, найнижчі значення всіх розрахованих індексів червоного краю характерні для ОП різновиду лютесценс. Зокрема, значення REP для безостих пшениць майже на 7 нм, а значення TCI та $NDVI_{705}$ достовірно майже вдвічі нижчі, ніж в остистих пшениць. Це, вірогідно, зумовлене тим, що відбивні поверхні посівів пшениць з безостим колосом в умовах Степової зони України до середини червня 2010 р. помітно втратили фотосинтетичні пігменти (про це свідчить найменший хлорофільний індекс TCI) і візуально видавались жовтішими порівняно з остистими різновидами пшениці. Серед групи пшениць з різними за довжиною остюками для різновиду еритроспермум були властиві, як правило, колос зеленого кольору, а остюки – жовтуватого, в той час як у різновиду гордеїформе зеленими були і колос, і остюки (рис. 4.4).

Таблиця 4.1

Значення вегетаційних індексів червоного краю для різних сортів озимої пшениці на дрібноділянкових посівах Миколаївської області за даними спектрорадіометра FieldSpec3FR від 16.06.2010 р.

№ з/п	Сорт	REP (нм)	TCI	$NDVI_{705}$
1	Служниця	705,77	0,619	0,097
2	Безоста	711,91	0,812	0,101
3	Подолянка	719,69	1,710	0,329
4	Фаворитка	722,26	2,153	0,352
5	Херсонська безоста	716,40	1,274	0,234
6	Ліона	719,56	1,676	0,261
7	Селянка	718,9	1,647	0,286
8	Зміна	717,78	1,410	0,184
9	НІЧонія	718,07	1,459	0,215
10	Кірія	720,26	1,787	0,267
11	Турунчук	718,93	1,563	0,228
12	Шестопаловка	718,78	1,525	0,206
13	Отаман	721,66	2,178	0,360
14	Подяка	719,17	1,621	0,261
15	Пошана	719,9	1,706	0,237
16	Куяльник	720,51	1,894	0,268
17	Тітона	720,79	1,913	0,284
18	Кохана	722,2	2,387	0,355
19	Херсонська 99	720,86	1,911	0,290
20	Аргонавт	721,1	2,289	0,424
21	Лагуна	722,59	2,511	0,412
22	Дельфін	722,7	2,541	0,445
23	Алий парус	722,17	2,366	0,419

Таблиця 4.2

Значення вегетаційних індексів червоного краю та коефіцієнтів їх варіації для різновидів озимої пшениці на дрібноділянкових посівах Миколаївської області за даними спектрорадіометра FieldSpec3FR від 16.06.2010 р.

Різновид	REP (нм)	TCI	$NDVI_{705}$	Коефіцієнти варіації, %		
				REP	TCI	$NDVI_{705}$
Безості (лютесценс)	715,21±2,93	1,31±0,28	0,22±0,05	0,91	48,11	54,45
Короткоостисті (еритроспермум)	718,90±0,32	1,58±0,05	0,24±0,01	0,12	8,30	15,70
Середньоостисті (еритроспермум)	720,73±0,38	1,94±0,10	0,29±0,02	0,14	13,55	15,98
Остисті (гордеїформе)	722,14±0,36	2,43±0,06	0,43±0,01	0,10	4,92	3,34

Як показали результати обчислень, серед різновидів остистих пшениць зі збільшенням довжини остюків зростають значення всіх трьох розрахованих вегетаційних індексів червоного краю. Отримані дані можна було б пояснити, враховуючи участь остюків колоса у процесі фотосинтезу, особливо під час достигання зерна після усихання нижніх листків у фазі молочно-воскової стиглості, в якій власне і перебували рослини на момент спектрометрування. Адже відомо, що остюки сприяють формуванню органічної речовини, частка їх внеску в цей процес становить до 41% від нагромаджених колосом або до 12% від нагромаджених рослиною [22], хоча, як зазначають [23], внесок остей у забезпечення продуктивності багато в чому залежить як від генотипу рослин, так і від факторів зовнішнього середовища. Проте, щоб достовірно оцінити внесок відбиття світла від остюків у сумарний спектр відбиття посіву і зіставити його із внеском відбиття від листків, потрібні подальші більш масштабні дослідження. Тому зазначимо, що отримані нами дані свідчать про неоднорідність спектрального відгуку посівів ОП молочно-воскової стиглості в зоні червоного краю, що слід брати до уваги при подальшому аналізі відповідних індексів, розрахованих за супутниковими даними.

А – ОП м'яка, колос безостий, різновид лютесценс, сорт Служниця

Б – ОП м'яка, колос короткоостистий, різновид еритроспермум, сорт Шестопаловка

В - ОП м'яка, колос середньоостистий, різновид еритроспермум, сорт Херсонська 99

Г – ОП тверда, різновид гордеїформе, сорт Аргонавт.

Рис. 4.4. Посіви ОП у Миколаївській області (16.06.2010 р.)

Для досліджених ділянок пшениці різновиду лютесценс властиве більше варіювання отриманих вегетаційних індексів, про що свідчать високі значення помилок середнього арифметичного кожного з них. Внаслідок цього при зіставленні значення REP безостих та остистих пшениць відмінність між середніми значеннями лише в 2,4 раза перевищує помилку середнього арифметичного для сортів з безостим колосом. Водночас, порівнюючи коефіцієнти варіації всіх трьох індексів, бачимо, що саме для REP характерні найменші ступені мінливості цього показника. Постає логічне запитання, чому сортам пшениць з безостим колосом притаманна доволі сильна варіативність індексу REP, у той час як мінливість його варіаційного ряду можна вважати незначною (адже вона не сягає навіть 1%). Попередню відповідь на це питання

можна отримати, проаналізувавши, які саме сорти безостої пшениці мають найбільші значення REP.

Як видно з табл. 4.2, найвищі показники REP пшениць з безостим колосом, майже тотожні значенням, отриманим для остистих пшениць, властиві безостим сортам Подолянка і Фаворитка. Це короткостеблові високоінтенсивні сорти ОП, які належать до нового покоління сортів, що забезпечують отримання рекордних урожаїв [23]. Колос рослин сорту Фаворитка майже безостий, тільки зрідка у верхній частині колосу можуть формуватися остюки, довжина яких коливається в межах 2-4 см. Як зазначалось вище, цей сорт належить до групи середньостиглих, тому у порівнянні з іншими середньоранніми сортами рослини цього сорту на час спектрометрування, ймовірно, містили більше хлорофілу, що підтверджується їх високим значенням хлорофільного індексу TCI. Цей сорт характеризується більшою тривалістю активної роботи листкової поверхні в репродуктивний період розвитку, що забезпечується підтриманням функціональної активності листків усіх ярусів рослини. Вченими ІФРГ НАН України у прапорцевих листках сорту Фаворитка в період наливу зерна було виявлено такі особливості обміну речовин, які сприяють підтриманню функціонального стану фотосинтетичного апарату на більш високому рівні порівняно з традиційним сортом Миронівська 808 [24].

Отже, можна припустити, що найбільший діапазон відхилень від середніх значень вегетаційних індексів червоного краю для сортів безостих пшениць спричинений більшою фотосинтетичною активністю нових високоінтенсивних сортів на противагу іншим сортам пшениць з безостим колосом. Звісно, вивчення виявленої особливості потребує більшої кількості дистанційних спектрометричних вимірювань і подальших досліджень на ширшому обсязі рослинного матеріалу.

Зіставляючи коефіцієнти варіації, розраховані для трьох досліджених індексів, відзначимо, що для REP властива незначна мінливість варіаційного ряду (менше 1% для всіх досліджених різновидів ОП), для TCI й $NDVI_{705}$ –

незначна та середня (за винятком безостих пшениць, які демонстрували високі показники строкатості цих індексів з причин, описаних вище). Можливо, це пов’язано з методиками обчислення даних індексів, адже розрахунок значень REP ведеться на підставі відбиття покриву на чотирьох довжинах хвиль, TCI – трьох, а $NDVI_{705}$ – лише двох. Оскільки більшість коефіцієнтів варіації за абсолютним значенням не перевищує 20%, можна стверджувати про порівняно незначну строкатість досліджуваних індексів червоного краю, а отже, про подальшу доцільність їх використання для вивчення особливостей відбиття РП [25, 26].

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

Проведено польові спектрометричні дослідження абсорбції CO_2 агрокультурами на тестовому полігоні “Березань” Київської області. Визначено корелятивні зв’язків з результатами аналогічних газометричних визначень. Використано метод оцінки фотосинтетичного компоненту потоків CO_2 при комбінації даних зйомки спектрорадіометра FieldSpec3FR та даних по потоках CO_2, отриманих при наземних газометричних вимірах. Застосовано підхід, пов'язаний з напівемпіричним статистичним моделюванням кореляційної залежності гіперспектральних поверхневих характеристик потоків CO_2, одержаних дистанційно [27] та шляхом газометричних вимірів, для різних сільськогосподарських культур. На основі кореляційної залежності отримано значення потоків CO_2, які відображають інтенсивність фотосинтезу для ОП, сої, кукурудзи, соняшника.

Існує кілька модельних підходів, що використовуються для одержання оцінок потоків CO_2 в екосистемі та її біологічної продуктивності [27]: 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 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 [28], щоб показати, що і NDVI і f_{APAR}, обидва, чутливі до величини поверхні листя в зеленому РП. Вчені [27] зв'язали біофізичні властивості покривів рослин і 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. Спроби моделювання та емпіричні дослідження дозволили встановити, що зв'язок між NDVI і f_{APAR} також нечутливий до змін зенітного кута сонячного освітлення.

Дослідження показали [29], 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:

$$NPP = (\varepsilon \times \Sigma f_{APAR}), \quad (4.2)$$

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 (4.2) можна переписати в термінах функції:

$$NPP = f(\varepsilon \times NDVI). \quad (4.3)$$

Зазвичай, ε не отримують безпосередньо з даних ДЗЗ. Згідно [30], ε – відносно постійне значення серед рослин одного і того ж метаболічного типу, яке може змінюватися в залежності від фенологічної стадії, кліматичних умов і водного стресу. Однак деякі нещодавні 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 в 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 в віолаксантин через активацію ензиму епоксидази в хлоропластах листя.

Рівняння (4.3) можна переписати, впроваджуючи PRI у вигляді коефіцієнта ефективності для короткочасної оцінки швидкості фотосинтезу в екосистемі (або для поглинання CO_2) так:

$$\text{Поглинання } CO_2 = f(PRI \times NDVI). \quad (4.4)$$

За допомогою фотосинтетичного потоку CO_2 від тестових ділянок в різні дні і за отриманими значеннями NDVI і sPRI можна протестувати "альтернативний підхід", який аналізувався. На підставі рівняння (4.4) була використана лінійна регресійна модель, щоб пов'язати значення сумарного фотосинтетичного потоку CO_2 з гіперспектральними індексами [31, 32]:

$$\text{Сумарне поглинання } CO_2 = a + b \times (sPRI \times NDVI). \quad (4.5)$$

Влітку 2014 р. співробітниками ЦАКДЗ ІГН НАН України проведено експериментальне дослідження на типовому для Лісостепової зони України полігоні "Березань", де розташовані угіддя ТОВ "Баришівська зернова компанія" з типовими агрокультурами. Коефіцієнти a і b було отримано шляхом розрахунку лінійної регресії між сумарним дихальним потоком CO_2 і добутком (sPRI × NDVI). Зіставлення газометричних та спектрометричних вимірів, виконаних у полуденний час 06.06 та 01.07.2014 р., чотирьох основних агрокультур (ОП, сої, кукурудзи, соняшнику) наведено у табл. 4.3.

Для регресійного аналізу використано відкоригований R^2 (коефіцієнт детермінації), оскільки він враховує кількість незалежних змінних, що входять в рівняння регресії.

Іншою мірою кореляції між залежними і незалежними змінними, використаними в цьому дослідженні, був критерій Фішера – значення ймовірності p-значення. 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 (рис. 4.5), а індекс PRI показав відповідну залежність при R^2=0.627 (рис. 4.6). Кореляція NDVI з PRI досить значуща R^2=0,9283 (рис. 4.7) [32].

Таблиця 4.3

Характеристика природних умов та газо- і спектрометричних особливостей агрокультур полігону ”Березань” на час проведення досліджень

Дата	6 червня 2014 р.					1 липня 2014 р.			
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 (μмольм-2с-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 - ОП Скаген № 2 "Сотниківка"; 2 - ОП "Сонечко"; 3 – соя: 4 – кукурудза; 5 – соняшник; 6 - ОП "Сонечко"; 7 - ОП "Сонечко"; 8 - ОП Скаген № 2 "Сотниківка"; 9 - ОП Скаген № 2 "Сотниківка".

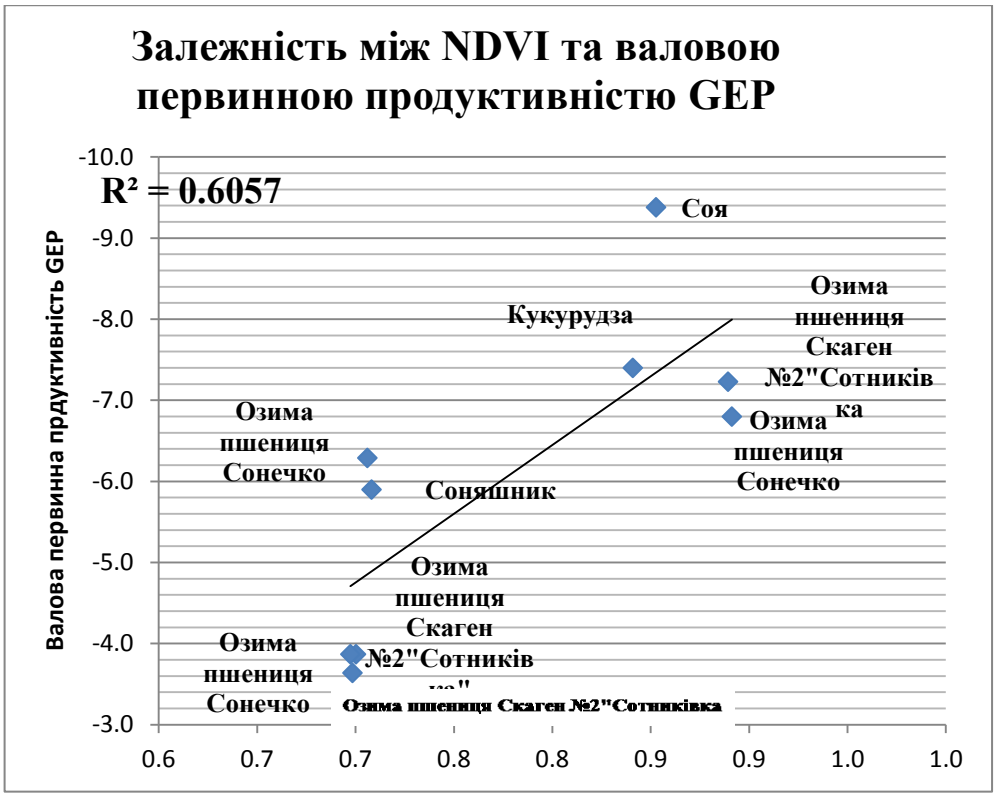


Рис. 4.5. Корелятивні залежності між NDVI та GEP

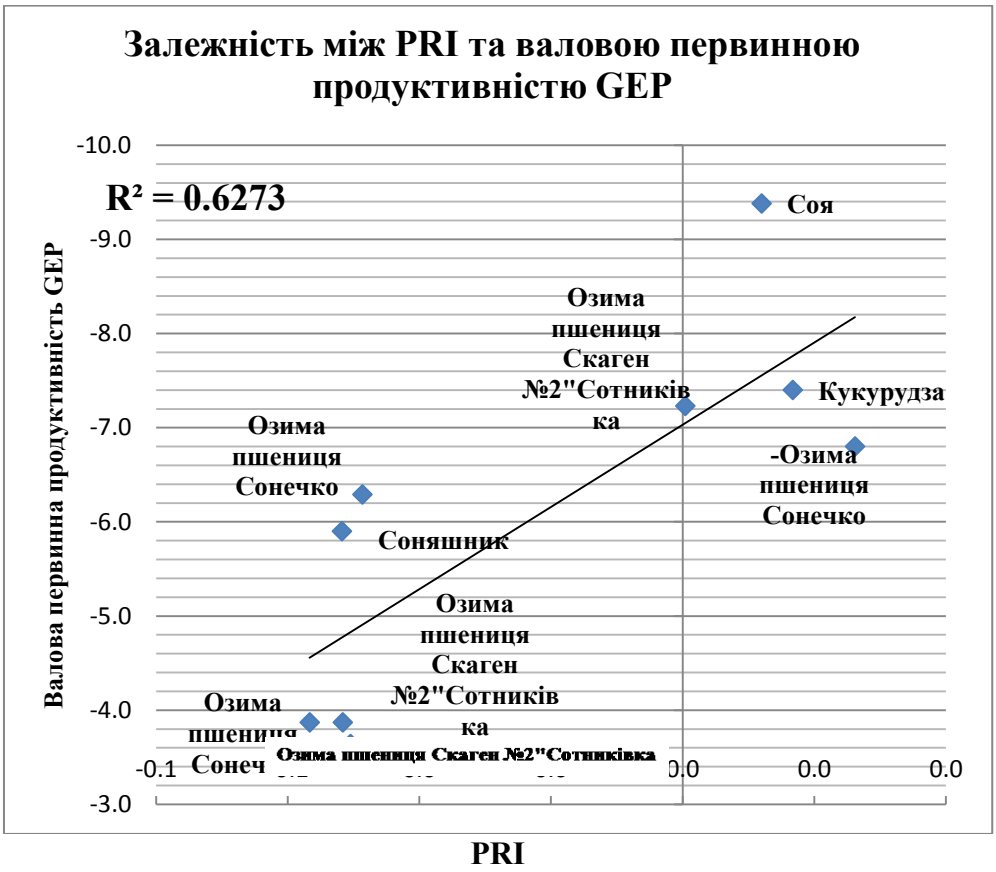


Рис. 4.6. Корелятивні залежності між PRI та GEP

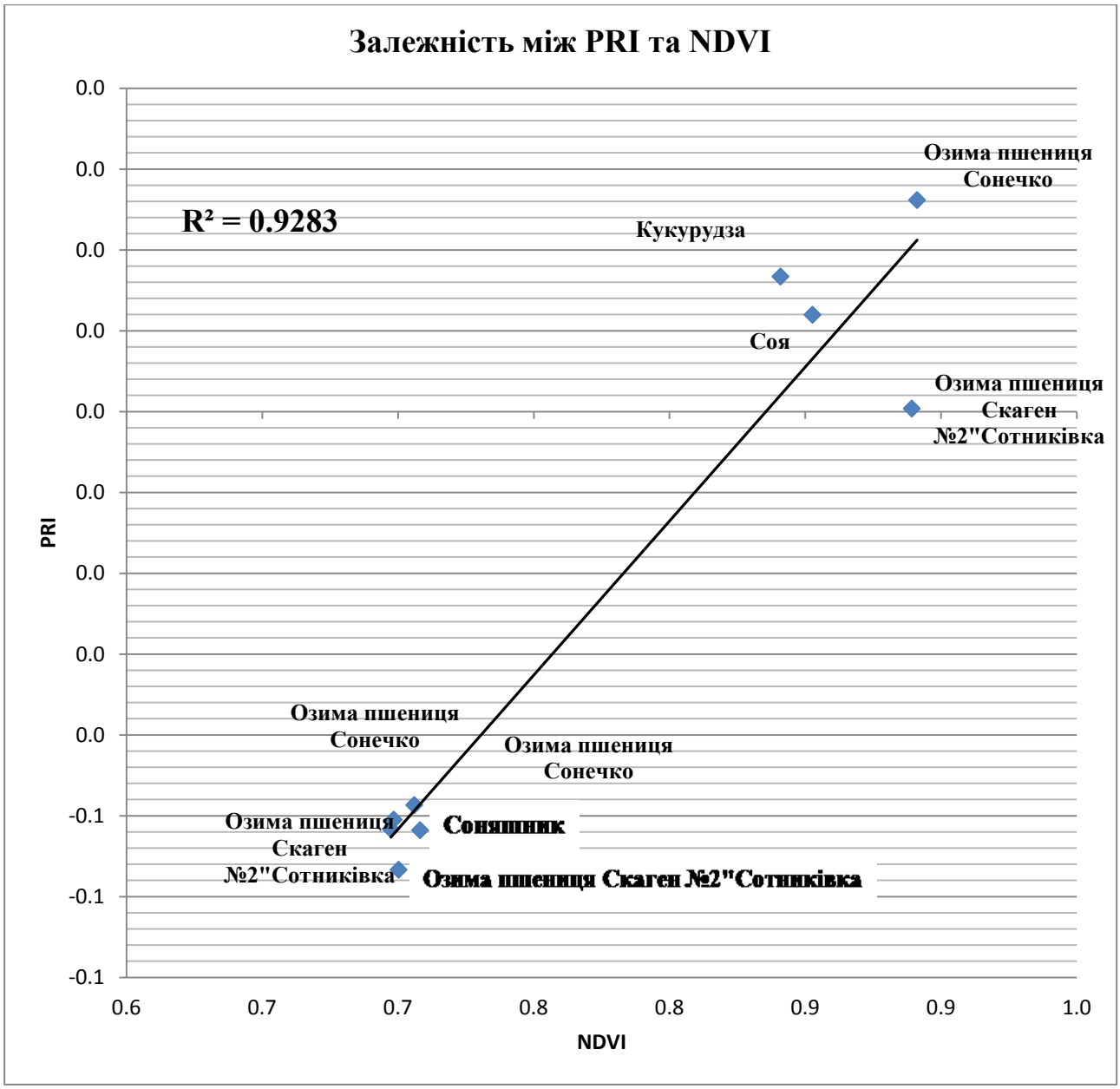


Рис. 4.7. Корелятивні залежності між PRI та NDVI

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 (рис. 4.8). Тобто кореляція виявилася середньою.

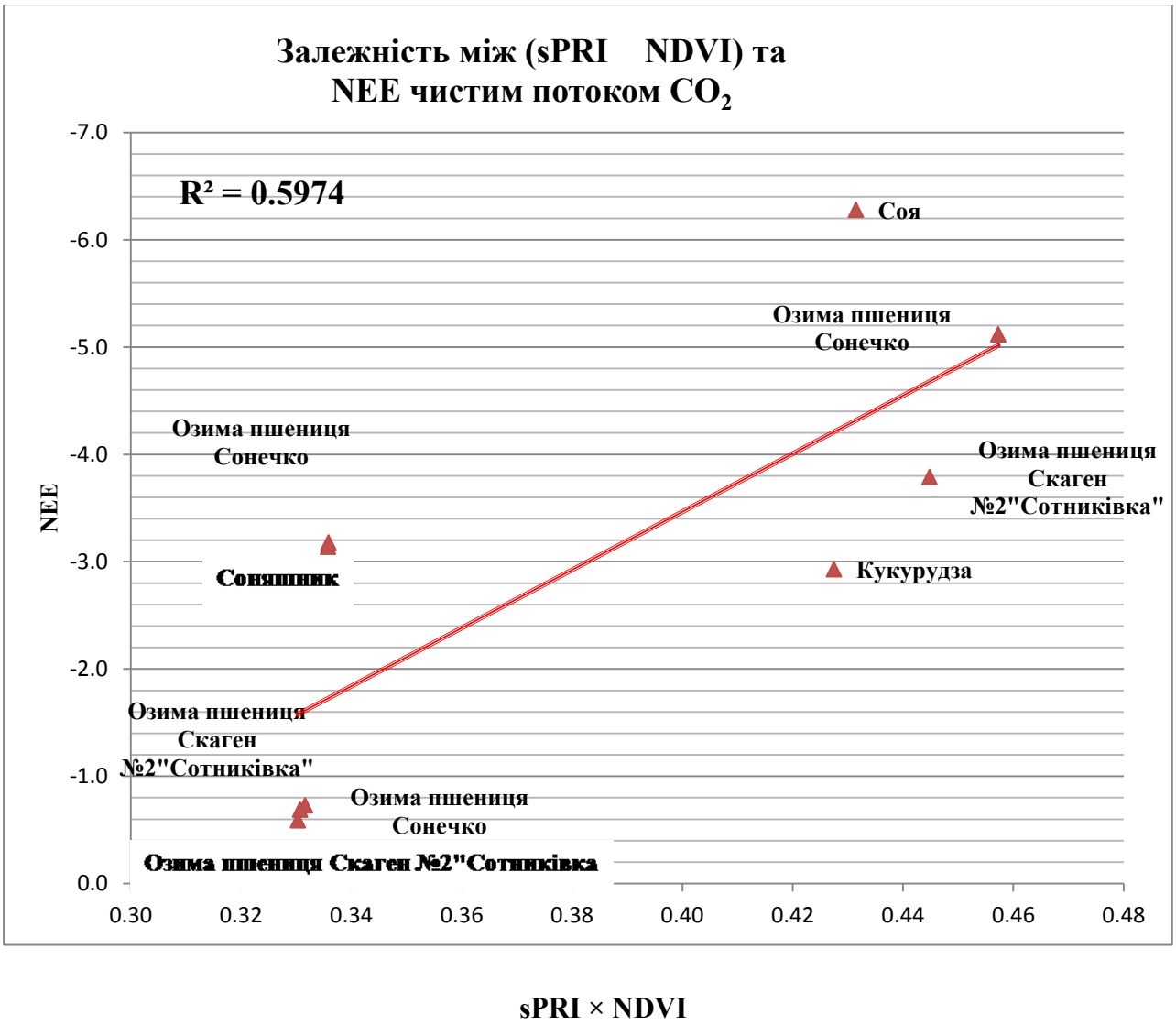


Рис. 4.8. Корелятивні залежності між (sPRI×NDVI) та NEE CO_2

Порівняння сумарного потоку CO_2 з добутком (sPRI × NDVI) показало більш значущу кореляцію з $R^2 = 0{,}6148$ (рис. 4.9). Лінійна залежність, отримана за допомогою рівняння (4.5) з сумарним потоком CO_2 привела в результаті до складання рівняння (4.6), за яким можна попередньо обчислювати абсорбцію CO_2 агрокультурами Лісостепової зони України:

$$\mathbf{CO_2 = -4{,}093 - 26{,}631 \times (sPRI \times NDVI).} \qquad (4.6)$$

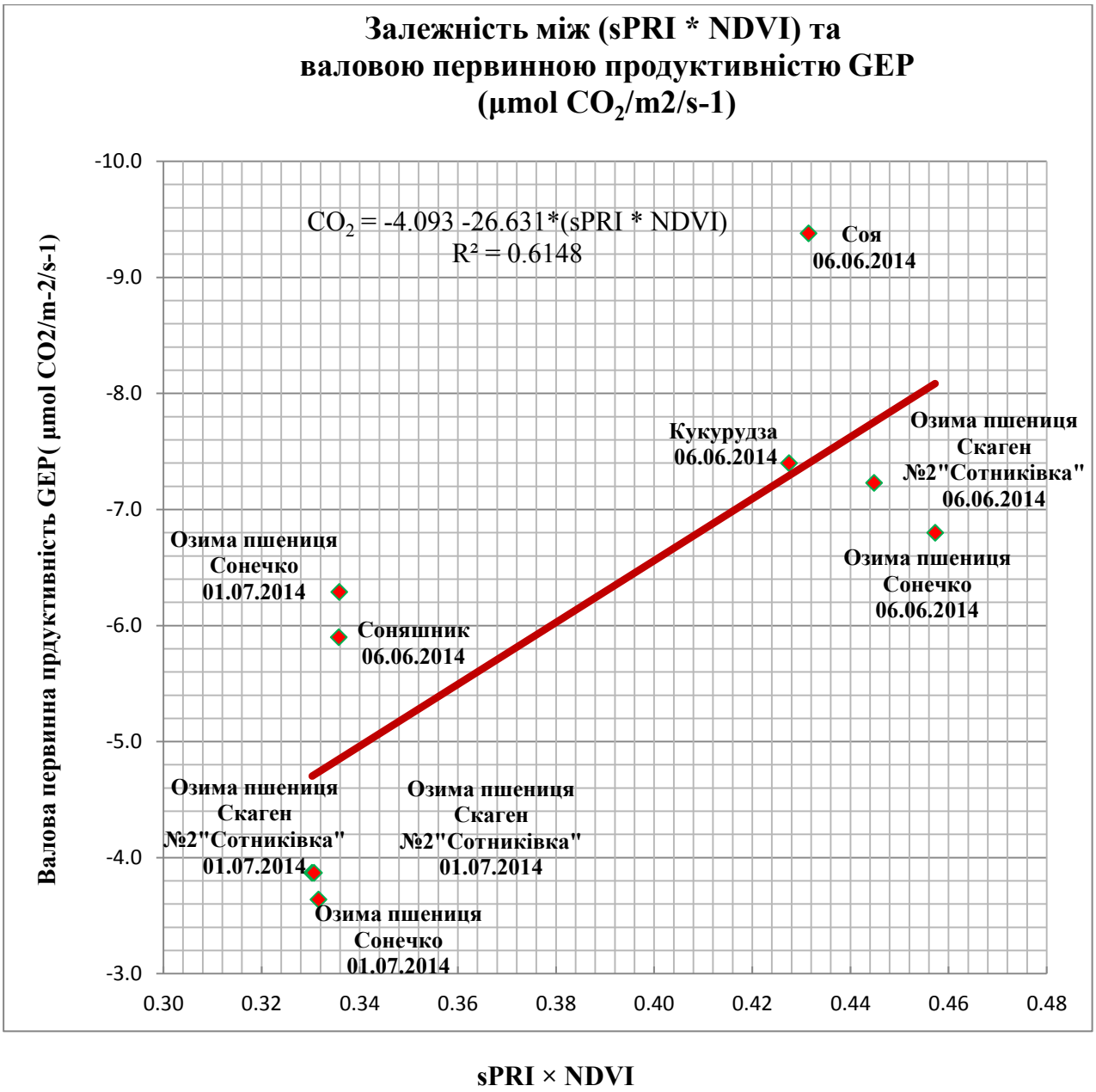


Рис. 4.9. Корелятивна залежність між (sPRI*NDVI) та GEP (µmol CO_2/m-2/s-1)

При цьому слід взяти до уваги, що кількість залучених вимірюваних даних у період польових експериментальних робіт була недостатньо репрезентативною і не охоплювала основні стадії вегетаційного розвитку досліджуваних агрокультур. Тому подібні дослідження будуть продовжені в наступних роках, що дасть можливість уточнити одержане рівняння (4.6) для розрахунку абсорбції CO_2 як основними агрокультурами, так і іншими рослинними покривам в різних ландшафтно-кліматичних зонах України [33].

4.4. Аналіз та порівняння вегетаційних індексів посівів озимої пшениці в умовах Лісостепової зони України (Київський полігон ДЗЗ) – Лісостеп

До середини 2015 р. одними з найбільш поширених супутникових даних, котрі використовувались для дистанційної оцінки змін довкілля, в тому числі і досліджень агроландшафтів, були знімки, виконані бортовими сенсорами американських КА програми *Landsat*, яка триває вже понад 40 років (додаток З). Проте 23 червня 2015 р. з космодрому Куру (Французька Гвіана) було виведено на орбіту супутник нового покоління *Sentinel-2A* Європейського космічного агентства (ЄКА). Цей запуск здійснено в рамках космічної програми геомоніторингу Землі Copernicus. Її метою є створення низки супутників, які збиратимуть величезний масив різних даних про стан планети. Всі ці показники після обробки і зіставлення повинні надати повну картину змін, що відбуваються на Землі. Згідно з умовами доступу до даних [34], різні групи користувачів мають вільний доступ до тієї інформації, яка становить для них інтерес.

Програма *Sentinel ЄКА* охоплює п'ять різновидів супутників: *Sentinel-1* призначений для отримання комплексних радіолокаційних даних; *Sentinel-2* і *Sentinel-3* забезпечують моніторинг земної поверхні й океану за допомогою мультиспектральних інструментів; *Sentinel-4* і *Sentinel-5* створені для метеорологічних і кліматичних досліджень, що ґрунтуються на вивченні складу атмосфери.

Вже через кілька днів після виходу на орбіту КА *Sentinel-2A* було отримано перші знімки дуже високої якості. Камери супутника охоплюють смугу шириною 290 км, що на 65 км більше, ніж у КА *Landsat-8*, та й просторова розрізненність більшості спектральних каналів у нього краща у порівнянні з американськими КА. Згідно з технічними характеристиками, систематичне покриття КЗ *Sentinel-2* території планети здійснюватиметься між 84° пн. ш. і 56° пд. ш., з частотою зйомки на рівні екватора приблизно раз в п'ять днів (після запуску *Sentinel-2B*), в середніх широтах – раз в два-три дні.

Висота орбіти супутника становить 786 км. Зйомка ведеться в 13 спектральних каналах з просторовим розрізненням 10, 20 або 60 м (табл. 4.4) [35].

Таблиця 4.4

Коротка характеристика каналів супутників місії *Sentinel-2* [35]

Номер каналу	Центральна довжина хвилі, нм	Ширина каналу, нм	Просторова розрізненність, м
2	490	65	10
3	560	35	10
4	665	30	10
8	842	115	10
5	705	15	20
6	740	15	20
7	783	20	20
8a	865	20	20
11	1 610	90	20
12	2 190	180	20
1	443	20	60
9	945	20	60
10	1 375	30	60

Відомо, що вегетаційні індекси (ВІ), розраховані за допомогою комбінування коефіцієнтів відбиття різних спектральних діапазонів, особливо в області червоного краю, є надійним інструментом оцінки стану РП. У статті [36] можна ознайомитись з великою кількістю проаналізованих ВІ, отриманих як за даними *Sentinel-2*, так й інших КА, та їх потенціалом для виділення окремих елементів ландшафту, розрізнення посівів кукурудзи від пасовищ чи класифікування різних типів лісів. Тому, з огляду на появу високоякісних знімків з КА *Sentinel-2* надзвичайно актуально дослідити їх придатність для розв’язання різноманітних наукових та народногосподарських задач.

Зіставлення вегетаційних індексів, обчислених одночасно як за супутниковими даними КЗ *Sentinel-2A*, так і за результатами наземного

спектрометрування посівів ОП спектрорадіометром FieldSpec3FR, є дуже актуальними для верифікації.

ОП двох сортів Скаген (поле 1) і Богдана (поле 2) вирощувалась під урожай 2016 р. на угіддях Баришівської зернової компанії поблизу м. Березань Баришівського району Київської області. На цих полях були вибрані тестові ділянки, типові за густотою стояння рослин. Тут здійснєно спектрометрування та визначєно інші параметри, що характеризують продукційний процес. Розташування тестових ділянок на двох досліджених у 2016 р. полях представлено на рис. 4.10. На рис. 4. 11 наведено синтезоване зображення знімка *Sentinel-2* від 08.04.2016 р. тестових ділянок сільськогосподарських угідь полігону «Березань». На рис. 4. 12 розраховано індекс NDVI зі знімка *Sentinel-2* тестової ділянки сільськогосподарських угідь полігону «Березань» від 08.04.2016 р.

Спектрометрування посівів ОП здійснено від 12-ї до 15-ї години при ясній погоді польовим спектрорадіометром FieldSpec3FR.

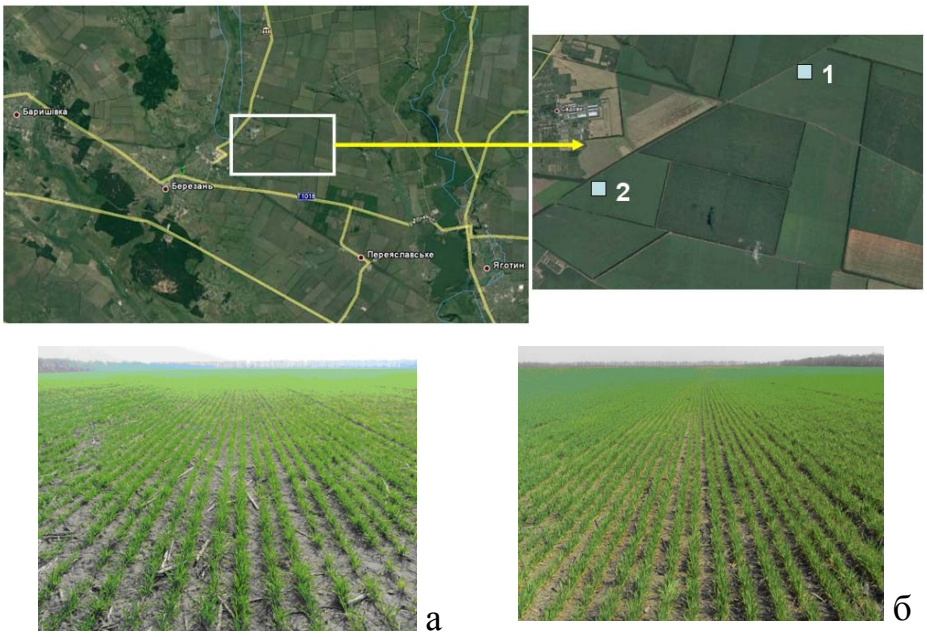


Рис. 4.10. Схема розташування тестових ділянок на досліджених полях у Баришівському районі Київської області (2016 р.): а – дослідне поле 1, ОП сорту Скаген; б – дослідне поле 2, ОП сорту Богдана

Для отримання спектрів відбиття оптичну насадку спектрорадіометра FieldSpec3FR встановлено з краю посіву на центральній поздовжній осі ділянки. Кут огляду використаного об'єктива – 1°; тримач пістолетного типу з оптичною насадкою закріплювався на стандартному штативі з висотою над поверхнею ґрунту – 1,2 м; віддаль від об'єктива до ділянки спектрометрування посіву – 5 м; величина площі посіву, яка потрапляє в поле зору, – 80 см^2; кут нахилу оптичної осі об'єктива до вимірюваної площі – 14°. Калібрування до білого еталона прововено перед кожним вимірюванням на ділянці. Дані 10 повторів спектрометрування одного місця поверхні посіву кожного сорту автоматично усереднено за програмою. Отриманий результат використано для обчислення коефіцієнтів відбиття та вегетаційних індексів.

Досліджені такі вегетаційні індекси, обчислені в області червоного краю: за (3.12) - позиція червоного краю REP [37, 38]; (4.1) - Мерісівський наземний хлорофільний індекс MTCI [39]; (4.7) - модифікований нормалізований вегетаційний індекс червоного краю NDRE1 (Normalised Difference Index Red Edge1) [37]; (4.8) - модифікований нормалізований вегетаційний індекс червоного краю NDRE2 (Normalised Difference Index Red Edge2) [37]; (4.9) - хлорофільний індекс червоного краю $CI_{red\ edge}$ (ratio red edge chlorophyll index) [37]; (4.10) - хлорофільний індекс в зеленій зоні CI_{green} (ratio green chlorophyll index) [37]; (4.11) - вегетаційний індекс нормалізованої різниці NDVI (740, 665) (Normalised Difference Vegetation Index); (4.12) - хлорофільний індекс простого відношення ZM (750, 710) (Zarco and Miller ratio chlorophyll index) [38]; (4.13) - індекс простого відношення SR (670, 820) (Simple ratio) [39]; (4.14) - хлорофільний індекс подвійного відношення DRI_{CI} (Double ratio index) [39].

Ці індекси обчислено за такими формулами:

$$NDRE1 = \frac{R(740) - R(705)}{R(740) + R(705)} \tag{4.7}$$

$$NDRE2 = \frac{R(783) - R(705)}{R(783) + R(705)} \tag{4.8}$$

$$CI_{rededge} = \left(\frac{R(783)}{R(705)}\right) - \tag{4.9}$$

$$CI_{green} = \left(\frac{R(783)}{R(560)}\right) - \tag{4.10}$$

$$NDVI = \frac{R(740) - R(665)}{R(740) + R(665)} \tag{4.11}$$

$$ZM = \frac{R(750)}{R(710)} \tag{4.12}$$

$$SR = \frac{R(670)}{R(820)} \tag{4.13}$$

$$DRI_{CI} = \frac{CI_{rededge}}{SR} \tag{4.14}$$

де R(λ) – значення коефіцієнта відбиття на довжині хвилі λ, нм.

Для тестових ділянок досліджуваних полів у точках із заданими координатами (точка № 1- центр виділеної ділянки 1-го поля, точка № 2 - центр виділеної ділянки 2-го поля), на одну й ту ж дату були одержані дані з КА *Sentinel-2A* і дані точкового наземного спектрометрування посівів ОП приладом FieldSpec3FR, за якими були обчислені вегетаційні індекси. За даними КЗ *Sentinel-2A* вегетаційні індекси обчислювали не тільки в точці № 1 із заданими координатами, але й вираховували середні значення вегетаційних індексів для площі 10x10 пікселів (що відповідає 1 га) для кожного поля з центрами в точках № 1 і № 2 (рис. 4.11, 4.12). На жаль, 10.05.2016 р. знімок з КА *Sentinel-2A* відсутній, тому зіставлення ВІ для цього дня не виконувалось.

Значення вегетаційних індексів, порахованих за формулами (3.12), (4.7)-(4.14), за даними *Sentinel-2A* та польовими спектрометричними даними наведено в табл. 4.4-4.12. Середні значення індексів за супутниковими даними позначено цифрами з горизонтальною рискою вгорі.

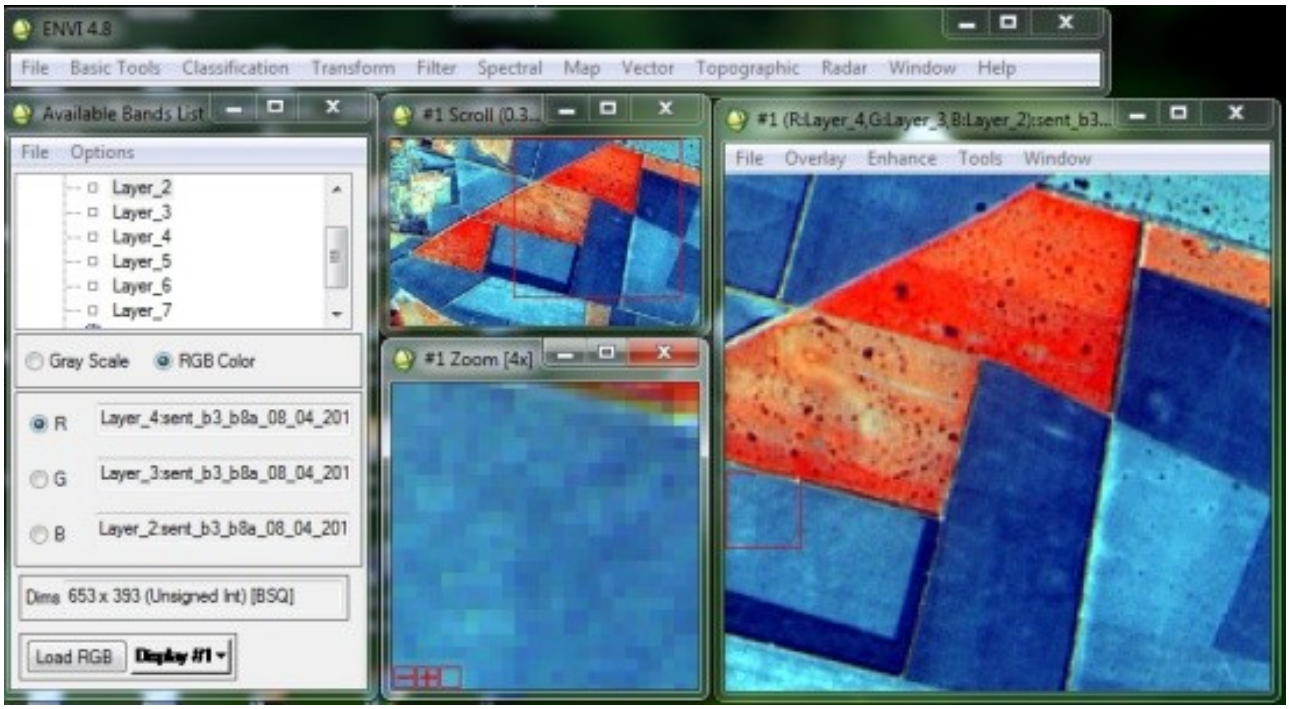


Рис. 4.11. Синтезоване зображення знімка *Sentinel-2* тестових ділянок сільськогосподарських угідь полігону «Березань» від 08.04.2016 р.

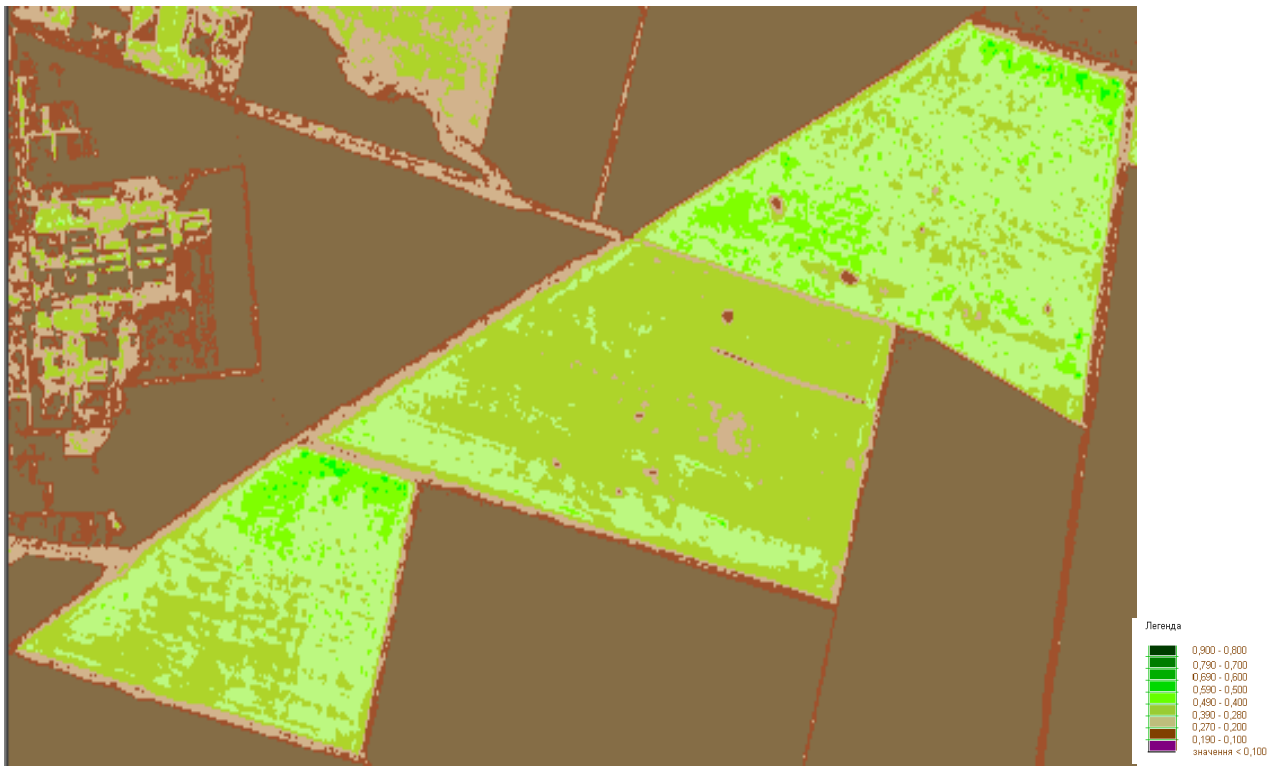


Рис. 4.12. Індекс NDVI, розрахований з знімка *Sentinel-2* тестових ділянок сільськогосподарських угідь полігону «Березань» від 08.04.2016 р. Спектральний канал 660, 840 нм, номери каналів (8-4)/(8+4)

Таблиця 4.4

Значення вегетаційних індексів, обчислених за даними *Sentinel-2A*, для посівів ОП від 08.04.2016 р.

№ поля, сорт ОП	Значення ВІ (за координатами) і середні значення ВІ									
	REP, нм	MTCI	NDRE1	NDRE2	$CI_{rededge}$	CI_{green}	NDVI	ZM	SR	DRI_{CI}
1, Скаген	726.60 / 722.80	4.3604 / 3.695	0.283 / 0.256	0.355 / 0.328	1.099 / 0.986	1.083 / 1.061	0.345 / 0.351	1.789 / 1.690	0.450 / 0.428	2.441 / 2.317
2, Богдана	724.10 / 723.28	3.668 / 3.641	0.268 / 0.267	0.351 / 0.344	1.081 / 1.046	1.191 / 1.173	0.368 / 0.369	1.732 / 1.728	0.398 / 0.407	2.642 / 2.580

Таблиця 4.5

Значення вегетаційних індексів, обчислених за польовими спектрометричними даними FieldSpec3FR, для посівів ОП від 08.04.2016 р.

№ поля, сорт ОП	Значення ВІ за координатами									
	REP, нм	MTCI	NDRE1	NDRE2	$CI_{rededge}$	CI_{green}	NDVI	ZM	SR	DRI_{CI}
1, Скаген	720.81	3.031	0.509	0.567	2.617	4.182	0.814	2.714	0.084	31.227
2, Богдана	722.15	3.567	0.564	0.627	3.365	5.359	0.859	3.126	0.060	55.864

Таблиця 4.6

Значення вегетаційних індексів, обчислених за даними *Sentinel-2*A, для посівів ОП від 28.04.2016 р.

№ поля, сорт ОП	Значення ВІ (за координатами) і середні значення ВІ									
	REP, нм	MTCI	NDRE1	NDRE2	$CI_{rededge}$	CI_{green}	NDVI	ZM	SR	DRI_{CI}
1, Скаген	726.65 / 726.00	6.064 / 5.313	0.592 / 5.515	0.623 / 0.613	3.362 / 3.181	3.430 / 3.330	0.675 / 0.680	3.245 / 3.132	0.161 / 0.148	20.936 / 22.255
2, Богдана	725.91 / 724.48	4.333 / 4.575	0.479 / 0.493	0.584 / 0.584	2.804 / 2.813	3.056 / 3.011	0.663 / 0.674	2.838 / 2.949	0.166 / 0.156	18.620 / 18.271

Таблиця 4.7

Значення вегетаційних індексів, обчислених за польовими спектрометричними даними FieldSpec3FR, для посівів ОП від 28.04.2016 р.

№ поля, сорт ОП	Значення ВІ за координатами									
	REP, нм	MTCI	NDRE1	NDRE2	$CI_{rededge}$	CI_{green}	NDVI	ZM	SR	DRI_{CI}
1, Скаген	724.67	4.577	0.608	0.683	4.307	6.734	0.854	3.723	0.059	72.653
2, Богдана	722.69	3.674	0.556	0.623	3.310	5.221	0.834	3.140	0.072	46.262

Таблиця 4.8

Значення вегетаційних індексів, обчислених за польовими спектрометричними даними FieldSpec3FR, для посівів ОП від 10.05.2016 р.

№ поля, сорт ОП	Значення ВІ за координатами									
	REP, нм	MTCI	NDRE1	NDRE2	$CI_{rededge}$	CI_{green}	NDVI	ZM	SR	DRI_{CI}
1, Скаген	727.38	5.752	0.698	0.776	6.937	11.030	0.932	5.010	0.024	290.84
2, Богдана	724.88	4.502	0.616	0.692	4.499	6.709	0.872	3.765	0.051	88.870

Таблиця 4.9

Значення вегетаційних індексів, обчислених за даними *Sentinel-2A*, для посівів ОП від 17.06.2016 р.

№ поля, сорт ОП	Значення ВІ (за координатами) і середні значення ВІ									
	REP, нм	MTCI	NDRE1	NDRE2	$CI_{rededge}$	CI_{green}	NDVI	ZM	SR	DRI_{CI}
1, Скаген	729.25 / 729.24	5.768 / 5.539	0.512 / 0.491	0.605 / 0.592	2.885 / 2.932	2.895 / 2.954	0.659 / 0.644	3.096 / 2.981	0.158 / 0.165	19.451 / 18.279
2, Богдана	724.07 / 724.06	3.253 / 3.270	0.326 / 0.324	0.409 / 0.405	1.388 / 1.362	1.561 / 1.576	0.474 / 0.470	1.968 / 1.961	0.300 / 0.300	4.678 / 4.582

Таблиця 4.10

Значення вегетаційних індексів, обчислених за польовими спектрометричними даними FieldSpec3FR, для посівів ОП від 17.06.2016 р.

№ поля, сорт ОП	Значення ВІ за координатами									
	REP, нм	MTCI	NDRE1	NDRE2	$CI_{rededge}$	CI_{green}	NDVI	ZM	SR	DRI_{CI}
1, Скаген	729.14	4.668	0.609	0.719	5.117	8.063	0.851	4.067	0.050	101.42
2, Богдана	720.54	2.182	0.407	0.486	1.894	3.338	0.728	2.248	0.117	16.190

При аналізі значень вегетаційних індексів РП за основ взята поведінка гіперспектрального індексу REP як індикатора стресу рослинності. За даними наукових досліджень [40, 41], вегетаційний індекс REP є індикатором стану рослинності і може слугувати показником стійкості рослинних угруповань. Вегетаційні стреси, викликані різними чинниками, які призводять до зменшення вмісту хлорофілу, проявляються зсувами REP до коротких довжин хвиль, а зсув REP у спектрах відбиття РП в довгохвильовому напрямку виникає із збільшенням вмісту хлорофілу в рослинах на різних фенологічних фазах їх розвитку. Це і дає змогу використовувати REP для аналізу стану РП Землі за даними гіперспектральної космозйомки. Тому поведінка ВІ оцінюється відносно індексу REP.

На дату зйомки 08.04.2016 р. вегетаційні індекси REP, MTCI, NDRE1, NDRE2, $CI_{rededge}$, CI_{green}, NDVI, ZM, SR і DRI_{CI}, пораховані за даними КА *Sentinel-2*, демонструють однакову поведінку при зіставленні їх зі значеннями REP для ОП, окрім індексів MTCI та SR (табл.4.4). Індекс простого відношення SR (670, 820) є допоміжним індексом для обчислення хлорофільного індексу подвійного відношення DRI_{CI} (Double Ratio Index), який проаналізували і запропонували німецькі вчені в 2015 р. [39]. Треба мати на увазі, що цей індекс розраховується із залученням значно ширшого каналу № 8 супутника *Sentinel-2* з центром 842 нм і шириною 115 нм. За наведених даних видно, що в першу декаду квітня середні значення ВІ за *Sentinel-2A* для ОП сорту Скаген на 1-му полі менші, ніж на 2-му, де зростала пшениця сорту Богдана: ΔREP = 723.28 нм

- 722.8 нм = 0.48 нм, тобто у фазу кущіння сорт Богдана сформував більше зеленої маси. Те ж саме характерне і для ВІ на цю ж дату 08.04.2016 р., де представлені ті ж самі ВІ: REP, MTCI, NDRE1, NDRE2, $CI_{rededge}$, CI_{green}, NDVI, ZM, SR і DRI_{CI}, проте вже пораховані за даними наземного спектрометрування посівів приладом FieldSpec3FR. Тут також пшениці сорту Богдана значення REP більші, ніж у пшениці сорту Скаген: ΔREP = 722.15 нм - 720.81 нм = 1.34 нм; решта ВІ, окрім допоміжного індексу SR, на 2-му полі мають більші значення, ніж ВІ першого поля зі сортом Скаген.

Отже, на основі обробки даних КЗ *Sentinel-2* і за результатами, одержаними за даними спектрорадіометра FieldSpec3FR на дату 08.04.2016 р., у фазу кущіння рослини сорту Богдана демонструють кращі фотосинтетичні показники, ніж рослини сорту Скаген.

На наступну дату польових виїздів (28.04.2016 р.) спостерігаємо вже інший стан РП (табл. 4.6, 4.7). ВІ за даними *Sentinel-2* для ОП сорту Скаген на 1-му полі більші як за середніми значеннями ВІ, так і за значеннями ВІ, порахованими в точці спектрометрування, ніж на 2-му полі, де зростала пшениця сорту Богдана; $\Delta REP_{середнє}$ = 726.0нм – 724.48нм = 1.52 нм. Тобто, у вегетаційну фазу – вихід в трубку (друге міжвузля) пшениця сорту Скаген демонструє кращі спектральні характеристики, ніж сорт Богдана. Для ВІ, порахованих в точках спектрометрування для поля 1 і поля 2, маємо значення для поля 1 із сортом Скаген більші, ніж для поля 2 із сортом Богдана: ΔREP = 726.65 нм - 725.91 нм = 0.74 нм.

Те ж саме характерне і для ВІ, обчислених за даними наземного спектрометрування на цю ж дату 28.04.2016 р. Для пшениці сорту Богдана значення REP стають меншими, ніж у пшениці сорту Скаген: ΔREP = 722.15нм - 720.81 нм = 1.34 нм. Та й решта ВІ (окрім допоміжного індексу SR) для сорту Богдана мають менші значення у порівнянні з ОП сорту Скаген. Отже, за спектральними показниками, а точніше за вегетаційними індексами, розрахованими на дату 28.04.2016 р., у фазі виходу в трубку (друге міжвузля) за даними обробки КЗ *Sentinel-2A* і за результатами, одержаними з FieldSpec3FR,

спостерігається інверсія стану посівів двох сортів ОП: сорт Богдана демонструє гірші параметри, ніж сорт Скаген.

На 10.05.2016 р., фаза вегетації – вихід в трубку, здійснювалось тільки наземне спектрометрування посівів, оскільки, як зазначалось вище, знімка *Sentinel-2* на цю дату не виявилось. За результатами обробки даних спектрорадіометра FieldSpec3FR у пшениці сорту Скаген значення REP залишаються вищими, ніж у пшениці сорту Богдана на 2-му полі: ΔREP = 727.38 нм - 724.88 нм = 2.34 нм; решта ВІ проявляють таку ж тенденцію: у сорту Скаген вони мають більші значення, ніж у сорту Богдана (табл. 4.8).

На дату 17.06.2016 р. (фаза вегетації – молочна стиглість) пораховані ВІ за даними КЗ *Sentinel-2A* для ОП сорту Скаген більші як за середніми значеннями, так і за значеннями ВІ, обчисленими для точки з заданими координатами, у порівнянні з другим полем, де зростала пшениця сорту Богдана: $\Delta REP_{середнє}$ = 729.24 нм – 724.06 нм = 5.18 нм (табл. 4.9). Тобто, у фазу молочної стиглості пшениця сорту Скаген продовжує демонструвати кращий фотосинтетичний потенціал, ніж пшениця сорту Богдана. Для ВІ, порахованих за супутниковими даними, в заданих точках обох полів маємо значення для поля 1 з сортом Скаген більші, ніж для поля 2 зі сортом Богдана: ΔREP = 729.25 нм - 724.07 нм = 5.18 нм.

Подібне зберігається і для ВІ за даними наземного спектрометрування на цю ж дату 17.06.2016 р. (табл. 4.10). Зокрема, значення REP для пшениці сорту Богдана менші, ніж у пшениці сорту Скаген: ΔREP = 729.14 нм - 720.54 нм = 8.60 нм; решта ВІ для сорту Богдана менші, ніж ВІ сорту Скаген. Отже, у фазу молочної стиглості ВІ, обчислені як за даними обробки КЗ *Sentinel-2*, так і спектрорадіометра FieldSpec3FR, свідчать, що сорт Богдана має нижчі фотосинтетичні параметри, ніж сорт Скаген.

У фазу кущіння серед досліджених індексів лише NDRE1 та NDRE2 майже однакові за супутниковими і за спектрорадіометричними даними для обох сортів. Інші індекси відрізняються між собою, причому більші відмінності між фактичними значеннями індексів характерні для посіву ОП сорту Богдана

(лінії графіків не суміщаються), де значення всіх індексів майже вдвічі більші, ніж для ОП сорту Скаген (звертаємо увагу на умовні одиниці вертикальної осі). На початку виходу в трубку (поява другого міжвузля) різниця між величинами ВІ, розрахованими за даними *Sentinel-2A* і FieldSpec3FR, майже зникає, лише для CI_{green} та DRI_{CI} зберігається виявлена ще у попередній фазі незбіжність їх показників. Можливою причиною цих відмінностей може бути зазначена вище різниця у ширині вибраних каналів, що використовуються при обчисленні індексів. Причому останній індекс, розрахований за даними FieldSpec3FR, різко реагує на стан посіву: на тестових ділянках зі сортом ОП Богдана він у 1,5 раза нижчий, ніж у сорту Скаген.

Сказане справедливе і для ВІ, обчислених у фазу молочної стиглості. Це пояснюється передусім зростанням проективного покриття посівів впродовж весняно-літньої вегетації, що зумовлює елімінацію негативного внеску відбиття ґрунту міжрядь у формування спектрального сигналу відбиття посівів, зафіксованого у фазу кущіння. Водночас в процесі дозрівання посіву ОП сорту Богдана проявляється негативний вплив ураження рослин збудниками грибкових захворювань, що спричиняє значно нижчі величини їх ВІ у порівнянні зі сортом Скаген.

Були пораховані коефіцієнти кореляції за формулою Пірсона для всіх 10 індексів для тестових ділянок кожного поля з різними сортами ОП. Ці результати наведені в табл. 4.11, де графа «Джерело даних» *Sentinel* GPS означає обчислення супутникових ВІ в точці спектрометрування, а *Sentinel* Average – обчислення середніх значень супутникових ВІ для площі 10x10 пікселів, тобто 1 га. Окрім того, було розраховано середні похибки коефіцієнтів кореляції для невеликої кількості даних n=10 , які представлені в табл. 4.11.

Таблиця 4.11

Коефіцієнти кореляції між значеннями ВІ з *FieldSpec3F*R і *Sentinel-2A* для тестових ділянок полів 1 і 2 зі сортами ОП Скаген і Богдана впродовж весняно-літньої вегетації

Сорт ОП	Дата, фаза вегетації	08 квітня 2016 р., кущіння		28 квітня 2016 р., вихід в трубку		17 червня 2016 р., молочна стиглість	
	Джерело даних	Sentinel GPS	Sentinel Average	Sentinel GPS	Sentinel Average	Sentinel GPS	Sentinel Average
Скаген	FieldSpec	0.38	0.43	0.97	0.98	0.97	0.97
Богдана	FieldSpec	0.48	0.47	0.98	0.98	0.85	0.84

Таблиця 4.12

Середні похибки коефіцієнтів кореляції між значеннями ВІ з *FieldSpec3FR* і *Sentinel-2A* для тестових ділянок полів 1 і 2 зі сортами ОП Скаген і Богдана

Сорт	Дата, фаза вегетації	08.04.2016 р., кущіння		28.04.2016 р., вихід в трубку		17.06.2016 р., молочна стиглість	
	Джерело даних	Sentinel GPS	Sentinel Average	Sentinel GPS	Sentinel Average	Sentinel GPS	Sentinel Average
Скаген	FieldSpec	0,33	0,32	0,09	0,07	0,09	0,09
Богдана	FieldSpec	0,31	0,31	0,07	0,07	0,19	0,19

Згідно з наведеними даними табл. 4.11, кореляція на 08.04.2016 р. (кущіння) дуже слабка, а якщо взяти до уваги середню похибку коефіцієнтів кореляції $\varepsilon_{сер} \approx 0.32$ на цю дату за даними табл. 4.12, то кореляція взагалі відсутня. На дату 28.04.2016 р. (вихід в трубку) кореляція між значеннями ВІ за супутниковими і спектрорадіометричними даними для тестових ділянок поля 1 і поля 2 з ОП сортів Скаген і Богдана висока. Середнє значення похибки коефіцієнтів кореляції на цю дату становить $\varepsilon_{сер} \approx 0.08$. Тобто, маємо згідно з [42], сильну кореляцію на цю дату вимірювання. У фазі молочної стиглості (17.06.2016 р.) кореляція теж висока, і середнє значення похибки коефіцієнтів кореляції на цю дату $\varepsilon_{сер} \approx 0.14$ [43].

4.5. Виявлення просочування глибинних вуглеводнів за допомогою методів: варіації індексів червоного краю, індексів у SWIR-області та спектрометричної індикації спектрів відбиття пшениці (Кримський полігон ДЗЗ) – Степ

Як відомо [29, 44, 45], спектри відбиття рослинності реагують на просочування природного газу в ґрунті аномальними спектральними зсувами позиції червоного краю – REP. Розвиток і застосування гіперспектральних сенсорів для ДЗЗ земної поверхні дозволив використовувати цю властивість РП для виявлення вегетаційних стресів, спричинених витіканням нафти із нафтопроводів [28] та газу із газопроводів [27, 46]. Відомо також використання гіперспектральних даних сенсора *Hyperion* для розвідування газових родовищ [47].

Методика виявлення оптичної аномалії за даними спектрометричної зйомки рослинності над покладами ВВ орієнтована на кількісну оцінку зміни оптичних спектральних характеристик рослинності, серед яких особливу роль відіграють такі індекси червоного краю, як позиція червоного краю - REP та наземний хлорофільний індекс TCI.

Обидва ці індекси залежать від вмісту хлорофілу в рослинах, який є показником їхнього здоров’я. Оскільки аномальні концентрації ВВ в ґрунті впливають на здоров’я та ріст рослин, то зміни в рослинах, спричинені покладами ВВ, які відбиваються в оптичних характеристиках, можуть бути використані як індикатори аномалій просочування ВВ у ґрунті. Із розвитком гіперспектрального ДЗЗ з високою просторовою та спектральною розрізненністю з’явилась можливість кількісної оцінки стану рослинності [20, 48] за вегетаційними індексами червоного краю.

Спектрометрування пшениці над Глібовським газовим родовищем проведено дистанційно в сонячну погоду 27 травня 2010 р. портативним спектрорадіометром FieldSpec3FR. Вимірювання спектрів відбиття пшениці здійснено у 22 точках. Маршрут наземного знімання охоплював 11 точок на фоновій ділянці за межами родовища та 11 точок над Глібовським газовим

родовищем [49]. Протяжність маршруту – приблизно 2 км. Віддаль між точками спектрометрування – майже 100 м. В кожній точці за даними наземних вимірювань обчислено коефіцієнти відбиття пшениці та вегетаційні індекси *REP* і *TCI* за наведеними вище формулами (3.12), (3.14). Також обчислено фонові значення вегетаційних індексів як середні арифметичні їх значення в 11 точках на фоновій ділянці за межами родовища за такими формулами:

$$REP_{фон} = \sum_{i=}^{''} REP_i)/11; \tag{4.15}$$

$$TCI_{фон} = \sum_{i=}^{''} TCI_i)/11. \tag{4.16}$$

Відмінності в спектрах відбиття пшениці, спричинені просочуванням природного газу, продемонстровано на рис. 4.13. Спектрометричні коефіцієнти відбиття як функції довжини хвилі $R = R(\lambda)$ на відрізку 350, 1000 нм для пшениці, що росла за межами родовища $R_1(\lambda)$ та над Глібовським газовим родовищем $R_2(\lambda)$, одержані в результаті наземних вимірювань спектрорадіометром FieldSpec3FR.

Зіставлення наведених графіків свідчить (рис. 4.13), що над газовим родовищем коефіцієнт відбиття $R_2(\lambda)$ на відрізку $\lambda \in 350, 680$ нм збільшується, а на відрізку $\lambda \in 740, 1000$ нм зменшується відносно відповідних значень $R_1(\lambda)$ для пшениці за межами родовища. Зокрема, якщо приріст функції $R_1(\lambda)$ на відрізку $\lambda \in 700, 750$ нм становить 0,45 нм, то для $R_2(\lambda)$ – лише 0,30. Такі зміни відбиття пшениці над газовим родовищем призводять до зменшення величин *REP* (так званий “голубий зсув”) та *TCI*. Так, для $R_2(\lambda)$: *REP* = 717,76 нм, а *TCI* = 1,75 , а для $R_1(\lambda)$ *REP* = 722,57 нм, *TCI* = 2,83. Величини відхилень індексів відповідно дорівнюють: для *REP*: ΔREP = 717,76 нм -722,57 нм = -4.81 нм, для *TCI*: ΔTCI = 1,76 – 2,83 = -1,08. Зсув *REP* до коротких довжин хвиль становить понад 4 нм.

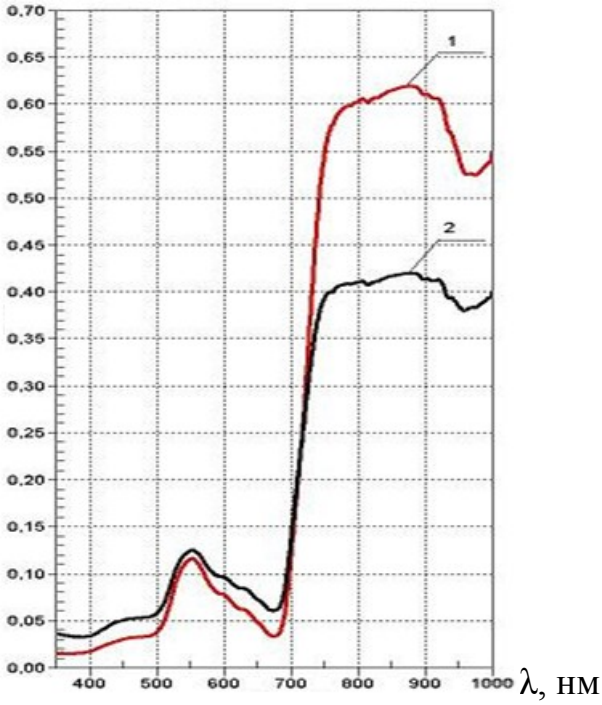


Рис. 4.13. Графіки зміни спектрометричних коефіцієнів відбиття пшениці за межами родовища $R_1(\lambda)$ та над Глібовським газовим родовищем $R_2(\lambda)$ за даними спектрорадіометра FieldSpec3FR від 27.05.2010 р.

Графіки величин вегетаційних індексів на маршруті наведено на рис. 1.14, 1.15. На горизонтальній осі нанесено порядкові номери точок проведення вимірювань: точки 1-11 розташовані за межами родовища, точки 12-22 – над Глібовським газовим родовищем. Зауважимо, що на рисунках віддаль між точками умовна і не відповідає віддалі між точками на місцевості. На рисунках також позначено фонові величини індексів: $REP_{фон}$ = 721,46 нм, $TCI_{фон}$ = 2,654, обчислені за формулами (4.15) і (4.16), відповідно.

Значення REP змінюються в межах від 717,76 нм (точка 17) до 723,57 нм (точка 3). Середнє арифметичне значення на профілі $REP_{сер}$ = 720,28 нм. Різниця між фоновим і середнім значеннями $REP_{фон}$ - $REP_{сер}$ = 1,17 нм. Середнє арифметичне значення над покладом REP_n менше, ніж $REP_{сер}$. Різниця $REP_{фон}$ - REP_n = 2,35нм. Величина “голубого зсуву“ дорівнює 2,35 нм. Таким чином, різниця між фоновим значенням *REP* і середнім значенням над покладом перевищує 2 нм. Різниця між фоновим значенням $REP_{фон}$ і мінімальним значенням дорівнює 3,7 нм.

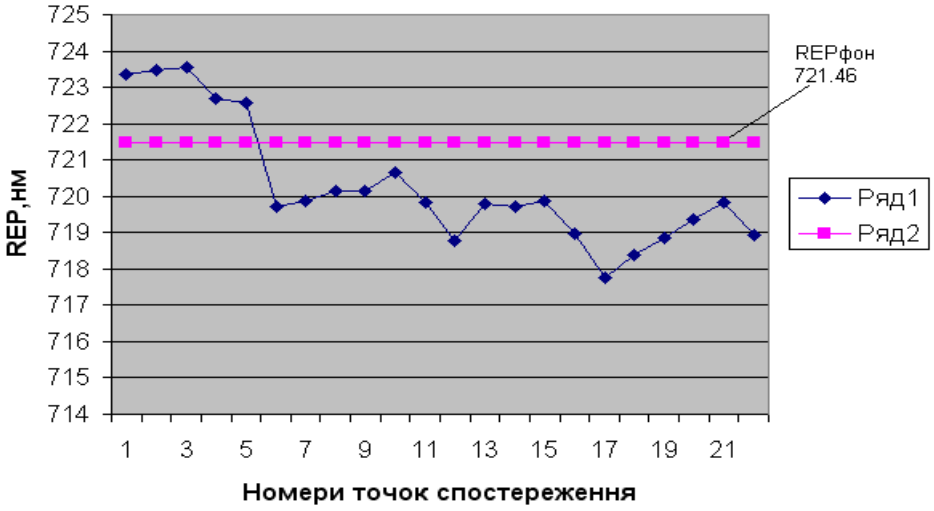


Рис. 4.14. Графік зміни значень вегетаційного індексу *REP* у точках маршруту спектрометричної зйомки пшениці на Глібовському газовому родовищі

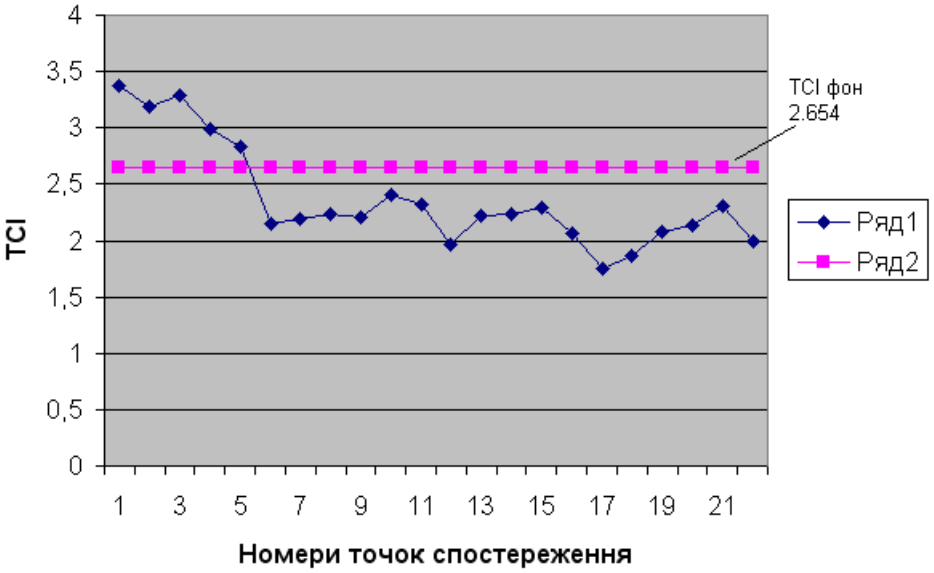


Рис. 4.15. Графік зміни значень вегетаційного індексу *TCI* у точках маршруту спектрометричної зйомки пшениці на Глібовському газовому родовищі

Згідно з даними обчислень наземного хлорофільного індексу *TCI* в точках маршруту (рис. 1.15), його значення змінюються в межах від TCI_{min} = 1,75 у 17-й точці до TCI_{max} = 3,378 у 1-й точці. Середнє арифметичне значення на маршруті $TCI_{сер}$ = 2,367. Різниця між мінімальним і фоновим значеннями *TCI*: TCI_{min} - $TCI_{фон}$ = -0,954, а між максимальним і фоновим значеннями становить TCI_{max} - $TCI_{фон}$ = 0,724. Різниця між максимальним і мінімальним значеннями *TCI* дорівнює 1,628.

Аналізуючи графіки варіацій REP і TCI для спектрів відбиття пшениці (рис. 4.14, 4.15), можна зробити висновок, що між величинами REP і TCI існує значуща кореляційна залежність. Коефіцієнт кореляції r = 0,987.

Наведені результати досліджень свідчать про те, що комплексне використання двох індексів REP та TCI, які реагують на зміну вмісту хлорофілу в пшениці, що відображається в спектрах відбиття і в значеннях вегетаційних індексів, може слугувати методом виявлення вегетаційних стресів і, відповідно, аномальних від'ємних значень вегетаційних індексів у місцях аномальних концентрацій газоподібних ВВ в ґрунті та бути ***нафтогазопошуковими індексами.***

Вперше проведено дослідження наявності аномалій індексів червоного краю REP та TCI, обчислених за гіперспектральними даними спектрометрування пшениці над покладом ВВ Глібовського газового родовища спектрорадіометром FieldSpec3FR. В результаті досліджень встановлено, що здоров'я 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. 4.13).

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 ВВ. Встановлено, що в місцях аномально високих концентрацій газоподібних ВВ у ґрунті значення REP та TCI зменшуються порівняно із їх значеннями для фонової ділянки за межами родовища.

Таким чином, гіперспектральне дистанційне зондування РП 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 у 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***. [51].

Аномальні концентрації ВВ у ґрунті, які виникають внаслідок їх просочування з родовищ газу та нафти або витікання з підземних трубопроводів, викликають певні зміни в РП Землі. Ці зміни впливають на спектри відбиття рослинності і спричиняють зміни нахилу спектральної кривої в області червоного краю 650-760 нм, що призводить до спектральних зсувів вегетаційного індексу позиції червоного краю REP – довжини хвилі, на якій досягається максимум нахилу спектра відбиття в області червоного краю [19].

Гіперспектральне дистанційне зондування РП над родовищами ВВ та нафтогазопроводами може бути використане для виявлення цих змін за допомогою гіперспектральних вегетаційних індексів, визначених в області червоного краю [18, 52, 53]. Так, у роботі досліджено вплив просочування підземного природного газу на позицію червоного краю REP [19] спектрів відбиття рослин, який проявлявся у зменшенні (“синій зсув”) значення REP внаслідок вегетаційного стресу, спричиненого аномальною концентрацією газу в ґрунті.

Вплив просочування природного газу на спектри відбиття ОП над газовим родовищем за польовими даними наземної спектрометричної зйомки досліджено у роботах [18, 52 ,53], в яких вивчалися варіації індексу червоного краю REP та мерісівського наземного хлорофільного індексу TCI [20] над Глібовським газовим родовищем. В результаті досліджень було встановлено [18, 52 ,53], що над газовим родовищем значення REP і TCI для спектрів відбиття ОП зменшуються порівняно з їх середніми значеннями за межами родовища.

Досліджено характер змін індексів TCI та REP за даними спектрометричної зйомки наземного покриву над нафтовим родовищем Приозерне спектрорадіометром FieldSpec3FR від 7 червня 2011 р. Складність проблеми аналізу змін вегетаційних індексів REP і TCI над нафтовим родовищем Приозерне полягає в наявності просторової неоднорідності в

наземному покриві. Для відокремлення точок з РП нами використано ідеї роботи [55]: комбінацію REP і модифікованого нормалізованого вегетаційного індексу $NDVI_{705}$ [56], порогове значення $NDVI_{705}$ та його кореляційний зв'язок із REP для точок з РП з високим коефіцієнтом кореляції. Крім того, досліджено кореляційні зв’язки між REP і TCI з метою виявлення можливості індексу TCI слугувати одним з пошукових індексів при розвідуванні родовищ ВВ.

Варто зауважити, що дослідження поведінки REP над нафтовим родовищем в Китаї для спектрів відбиття ярої пшениці за гіперспектральними даними польової спектрометричної зйомки та аерозйомки наведено в працях [54-58], де встановлено, що мікропросочування ВВ з нафтового родовища діє як удобрювач для росту пшениці і спричиняє збільшення REP до 744 нм проти величини 738 нм на площі, де мікропросочування відсутнє. Значення REP використано також в роботі [28] для визначення місця виливання нафти з трубопроводу та змін РП за гіперспектральними даними аерознімання сенсора *AVIRIS*. Зіставлення значень REP, обчислених для спектрів відбиття рослинності в зоні забруднення нафтопродуктами до аварії і після неї, показало зсуви REP в довгохвильову зону (“червоний зсув”).

Відомо, що більш високі об’єми міграції ВВ з родовищ нафти і газу спостерігаються в зонах розломів, а найбільш активно ці процеси відбуваються над газовими родовищами.

Приозерне нафтове родовище розташоване у південно-східній частині Керченського півострова на відстані 27 км від м. Керч (рис. 4.16) [59]. Поверхневі прояви нафти на Приозерній площі відомі з давніх часів. Посуд з нафтою цього родовища знайдено під час археологічних розкопок давніх міст Притакі та Танаїс. Перша свердловина тут закладена в 1886 р. З того часу на площі з перервами велися пошуки і видобувалася нафта. У 1951-1954 рр. були пробурені нові свердловини і встановлена промислова нафтоносність караганських та чокракських відкладів міоцену. Приозерне підняття має криптодіапірову будову. Вивчена частина його являє собою західну периклiналь брахіантиклінальної складки північно-східного простягання з

більш крутим південним крилом. Розміри структури у межах суходолу по ізогіпсі -750 м сягають 1,9х0,6 км, висота – до 300 м. Режим покладів нафти водонапірний. Родовище тривалий час знаходиться в консервації.

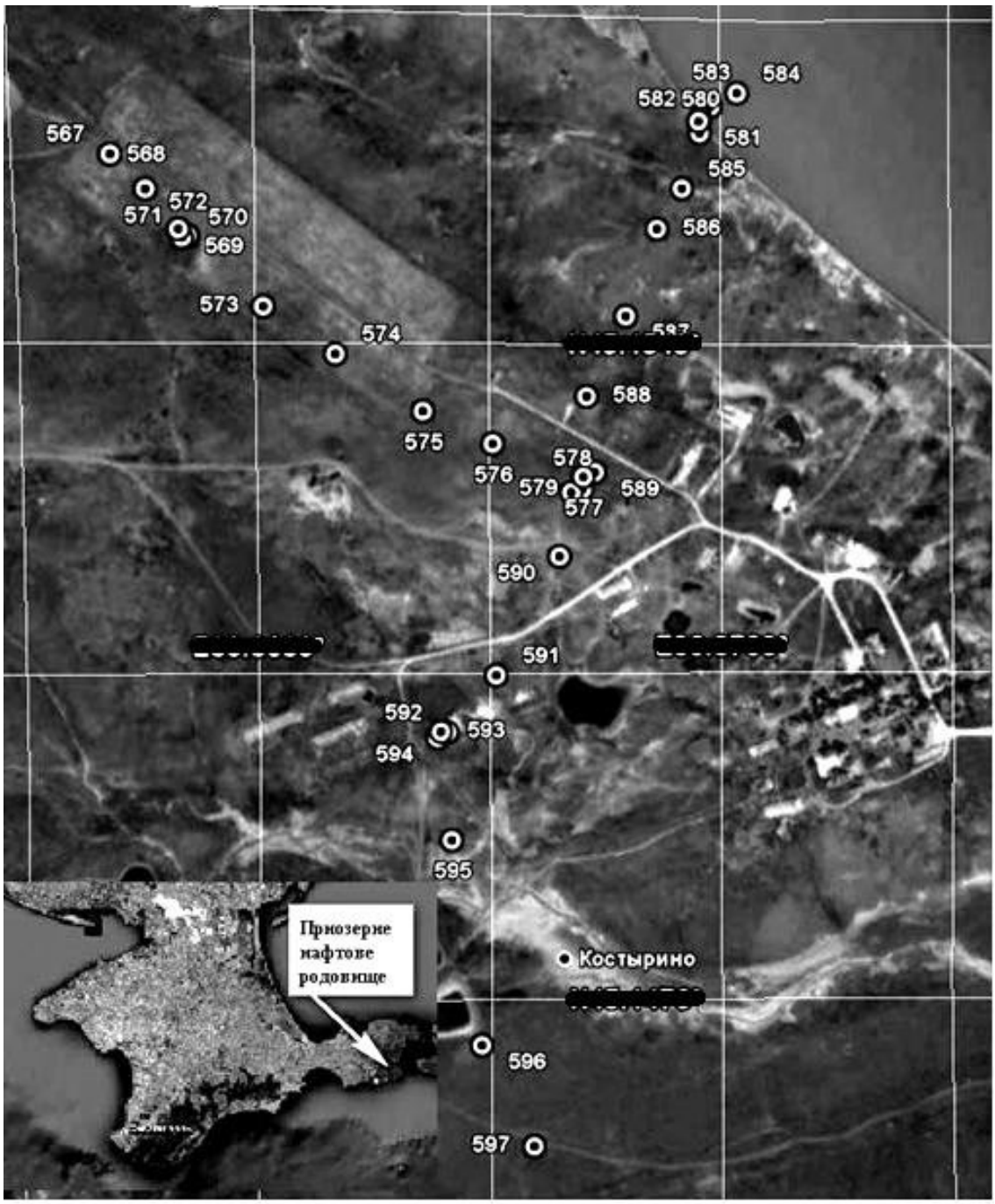


Рис. 4.16. Схема маршрутів з номерами точок спектрометрування наземного покриву над нафтовим родовищем Приозерне від 07.06.2011 р.

Спектрометрування наземного покриву над нафтовим родовищем Приозерне здійснено спектрорадіометром FieldSpec3FR дистанційно в сонячну погоду 7 червня 2011 р. на двох маршрутах, схеми яких з номерами точок спектрометрування наведено на рис. 4.16. Значення замірів спектральної яскравості в діапазоні 350-2500 нм конвертувалися у величини коефіцієнтів відбиття, які в подальшому використовували для досліджень.

Перший маршрут перетинає родовище в напрямку з північного заходу на південний схід і охоплює 13 точок з номерами 567-579. Другий простягається із північного сходу на південь і налічує 17 точок з номерами 580-583 та 585-597. Протяжність першого маршруту – приблизно 750 м, а другого – 1350 м.

В кожній точці обчислено значення вегетаційних індексів у області червоного краю $NDVI_{705}$ [56], REP і TCI [60-64].

Наземний покрив над родовищем характеризується просторовою неоднорідністю. Короткий опис наземного покриву у точках спектрометрування наведено в табл.4.13.

Крім опису наземного покриву, в таблиці подано порогове значення модифікованого нормалізованого різницевого індексу $NDVI_{705}$, яке встановлено на підставі корелятивного зв'язку між REP і $NDVI_{705}$ з високим коефіцієнтом кореляції для точок з РП. Співвідношення величин $NDVI_{705}$ і REP, обчислених за формулами (3.12), (4.1) у 29 точках спектрометрування, наведено на рис. 4.17.

На графіку не нанесено значення індексів в точці 593 для поверхні води, оскільки в цій точці значення REP перевищують більше ніж на 20 нм значення в інших точках, що характерно для водної поверхні.

Коефіцієнт кореляції між REP і $NDVI_{705}$ обчислено для 17 точок з РП за формулою Пірсона:

$$r = \frac{\sum_{i=}^{17} x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=}^{17} x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=}^{17} y_i - \bar{y})^2}} = 0{,}87, \qquad (4.17)$$

де $x_i = REP_i$ та $y_i = (NDVI_{705})_i$ – значення індексів у точці з порядковим номером i (i = 1, 17); $\bar{x} = \overline{REP} = 717{,}01$ нм та $\bar{y} = \overline{NDVI_{705}} =$ 0,2925 – середні арифметичні значення відповідних індексів.

Таблиця 4.13

Різновиди наземного покриву в точках спектрометрування над Приозерним нафтовим родовищем

№ з/п	Тип покриття	№ точки спектрометрування	Порогове значення $NDVI_{705}$
1	Лугова трава над родовищем	568, 569, 573-576, 588-591	$NDVI_{705} \geq 0{,}169$
2	Лугова трава біля клапана свердловини	577, 595	
3	Червона солончакова рослинність	582	
4	Полин біля свердловини	572	
5	Лугова трава за межами родовища	567, 596, 597	
6	Грунт із зрідженою луговою травою над родовищем	580, 586, 587	$NDVI_{705} < 0{,}169$
7	Сухий грунт	570, 578, 585	
8	Нафтонасичений грунт	571, 579	
9	Бура глина, зволожений суглинок	581, 583	
10	Сухий такирний грунт біля свердловини	594	
11	Калюжа біля свердловини з плівкою нафти	592, 593	

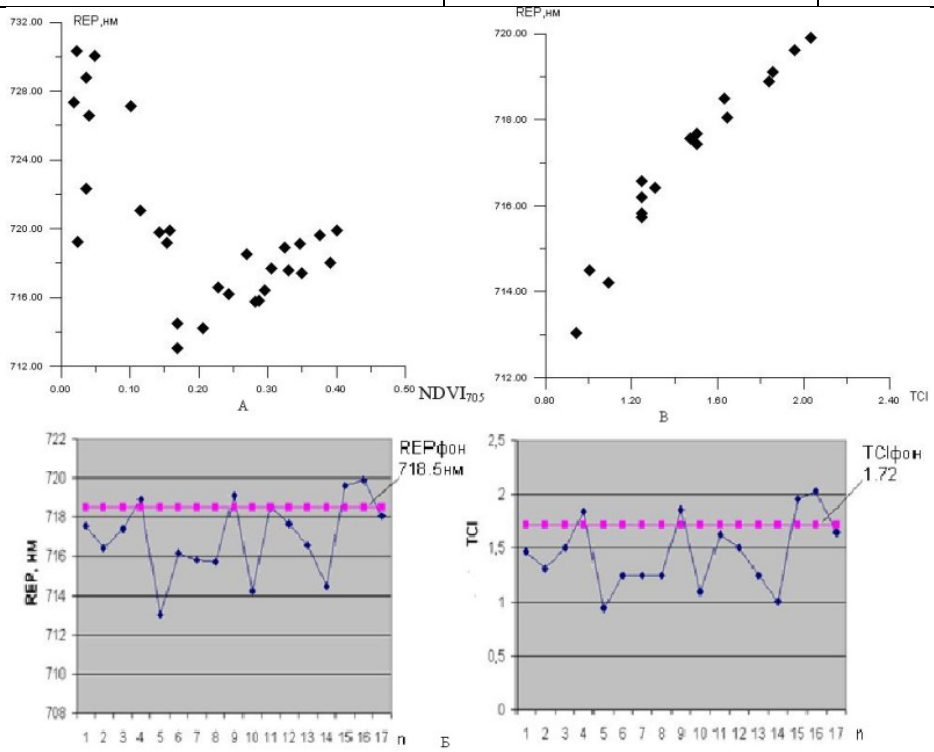


Рис. 4.17. Корелятивний зв'язок між величинами REP і $NDVI_{705}$

На рис. 4.17 чітко виділено порогове значення індексу $NDVI_{705}$ = 0,169, яке відокремлює точки з РП від решти точок. Співвідношення між REP і $NDVI_{705}$, наведене на рис. 4.17, для РП над нафтовим родовищем свідчить про те, що REP і TCI забезпечують реальні значення лише на густо зарослих площах із значеннями $NDVI_{705} \geq 0{,}169$.

З аналізу рис. 4.17 і таблиці різновидів наземного покриву в точках спектрометрування (табл. 4.18) можна зробити висновок про те, що індекси REP і TCI для точок, в яких $NDVI_{705} < 0{,}169$, є не вірогідними та не інформативними, оскільки це точки без РП або з низькохлорофільним покривом.

Графіки зміни вегетаційних індексів REP і TCI, обчислені за формулами (3.12), (3.14) в 17 точках з РП двох маршрутів, наведено на рис. 4.17.

Надалі у тексті при посиланні на номер n точки на рис. 4.17 відповідний номер на схемі маршрутів зйомки (рис. 4.16) вказується у дужках. Очевидно, що на рис. 4.17 відстань між точками не відповідає віддалі між ними на місцевості. Згідно з даними обчислень, значення REP змінюються від 713,03 нм у точці 5 (573) до 719,91 нм у точці 16 (596) з трав'яним покривом. Різниця між максимальним і мінімальним значеннями дорівнює 6,88 нм. Фонове значення $REP_{фон}$, обчислене як середнє арифметичне значень REP у точках 1 (567), 16 (596) і 17 (597), які знаходяться за межами родовища, становить $REP_{фон}$ = 718,5 нм. Різниця між фоновим і мінімальним значеннями REP у точці 5 (573), яка визначає величину "синього зсуву", дорівнює 5,17 нм. Характерною особливістю спектрів відбиття РП над нафтовим родовищем, на відміну від газового [18, 52, 53], є явище "червоного зсуву" – збільшення REP проти фонового значення у точках 4 (572), 9 (577), 15 (595), які розташовані над родовищем поблизу нафтових свердловин. Величина червоного зсуву незначна і у перших двох точках менше 1 нм, а у точці 15 (595) дорівнює 1,12 нм. Для решти точок над родовищем спостерігається зменшення значень REP – явище "синього зсуву".

Згідно з даними обчислень наземного хлорофільного індексу TCI, його значення змінюються від 0,944 у точці 5 (573) до 2,032 у точці 16 (596).

Фонове значення $TCI_{фон}$, обчислене як середнє арифметичне значень TCI для тих же точок, що і $REP_{фон}$, становить $TCI_{фон}$ = 1,716. Різниця між максимальним і мінімальним значеннями дорівнює 1,09, між мінімальним і фоновим – 0,772, а між максимальним і фоновим – 0,316.

Таким чином, для значень TCI у точках спектрометрування РП над родовищем характерним є зменшення значень TCI проти $TCI_{фон}$ у точках над родовищем; окрім точок, розташованих поблизу нафтових свердловин, в яких спостерігається збільшення TCI. Як випливає з наведених вище результатів, обидва індекси REP і TCI для РП у точках над нафтовим родовищем мають зменшені значення.

На рис. 4.17 показано кореляційну залежність між величинами REP і TCI у 17 точках з РП. Коефіцієнт кореляції між REP і TCI для цих точок, обчислений за формулою Пірсона (4.17), де $x_i = REP_i$ та $y_i = TCI_i$ – значення індексів у точці з порядковим номером і (i = 1,17) на рис. 4.17, $\bar{x} = \overline{REP}$ = 717,01 нм та $\bar{y} = \overline{TCI}$ = 1,458 – середні арифметичні значення відповідних індексів, дорівнює r = 0,97.

Значення коефіцієнта кореляції, близьке до 1, вказує на майже лінійну залежність між індексами REP і TCI у точках з РП як над нафтовим родовищем, так і за його межами: зменшення TCI щодо фонового в тих точках, у яких спостерігається “синій зсув” REP, і збільшення TCI у точках поблизу нафтових свердловин, у яких фіксується “червоний зсув” REP.

У точках з РП над нафтовим родовищем встановлено зменшення значень REP (“синій зсув” до 5 нм) і TCI; окрім точок поблизу нафтових свердловин, у яких спостерігається незначне збільшення значень REP (“червоний зсув” ≈ 1 нм) і TCI проти їх середніх значень для точок за межами родовища. Висока кореляція між REP і TCI з коефіцієнтом r = 0,97 свідчить про можливість як TCI, так і REP реагувати на зміни РП над родовищем ВВ і у такий спосіб слугувати одним з нафтогазопошукових індексів.

Така поведінка індексу TCI вказує на його можливість разом з індексом REP реагувати на зміни РП над нафтовим родовищем під впливом просочування ВВ, а отже, бути одним з нафтогазопошукових індексів. Варто зазначити, що дослідження поведінки вегетаційного індексу TCI під впливом просочування ВВ та кореляційного зв'язку REP за даними спектрометрування наземного покриву над ***нафтовим родовищем проведено вперше*** [60]**.**

Аномальні концентрації ВВ у ґрунті, які виникають внаслідок їх просочування із родовищ газу та нафти або витікання із підземних трубопроводів, викликають певні зміни в РП та на поверхні землі. Ці зміни впливають на спектри відбиття рослинності, що призводить до спектральних зсувів вегетаційного індексу позиції червоного краю довжини хвилі REP, на якій досягається максимум нахилу спектра відбиття у області червоного краю [61]. Вивчено спектри відбиття у SWIR-області, у випадку нафтових забруднень ґрунтів без РП.

Досліджено гіперспектральні індексів для розрізнення нафтовмісних ґрунтів за даними спектрометрування. Вивчено наземний покрив над нафтовим родовищем Приозерне спектрорадіометром FieldSpec3FR. Заміри проводено дистанційно в сонячну погоду 07.06.2011 р.

На рис.4.18 наведено схему розташування 13 точок без РП та із зрідженою рослинністю, виділених за умовою $NDVI_{705} < 0,169$.

Спектрометрування наземного покриву проводилося на двох маршрутах. Перший маршрут перетинає родовище з північного заходу на південний схід і охоплює 13 точок із номерами 567-579; другий простягається із північного сходу на південь, на ньому розташовано 17 точок із номерами 580-583 та 585-597. Протяжність першого маршруту сягає приблизно 750 м, а другого – 1350 м.

Рис. 4.18. Схема розташування і номери точок спектрометрування наземного покриву без рослинності або із зрідженою рослинністю над нафтовим родовищем Приозерне (07.06.2011 р.)

В табл. 4.14 наведено короткий опис наземного покриву в 13 точках спектрометрування, зображених на рис. 4.18, для яких виконується умова $NDVI_{705} < 0,169$. На першому маршруті із 13 точок виділено три точки з номерами 570, 571, 578; на другому маршруті із 17 точок використано 10 точок з номерами 579, 580, 581, 583, 585- 587, 592, 593, 594.

Таблиця 4.14

Різновиди ґрунтів та покриву із зрідженою рослинністю в точках спектрометрування над Приозерним нафтовим родовищем

№ з/п	Тип покриття	№ точки спектрометрування	Порогове значення $NDVI_{705}$
1	Грунт із зрідженою луговою травою над родовищем	580, 586, 587	$NDVI_{705} < 0,169$
2	Сухий грунт	578, 585	
3	Нафтонасичений грунт	570, 571, 579	
4	Бура глина, зволожений суглинок	581, 583	
5	Сухий такирний грунт біля свердловини	594	
6	Калюжа поблизу свердловини з плівкою нафти	592, 593	

Зіставлення спектрів, зображених на рис. 4.20, для шести різновидів наземного покриву свідчить про різноманітність їх форми як у зоні червоного краю 650-760 нм, так і в межах довжин хвиль 1700 нм та на довжині 2300 нм короткохвильового інфрачервоного SWIR-діапазону.

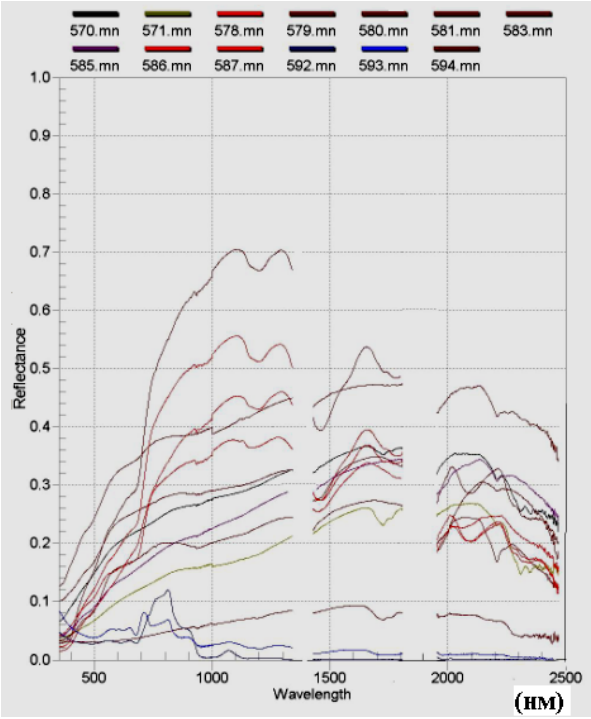


Рис. 4.20. Спектри відбиття в 13 точках спектрометрування різновидів наземного покриву

Як відомо, характерною властивістю нафтовмісних ґрунтів є особлива форма спектрів відбиття у вигляді локальних мінімумів у зонах абсорбції нафти в межах довжин хвиль 1730 і 2300 нм [28, 62, 63].

На рис. 4.21, 4.22 зображено спектри відбиття нафтонасичених ґрунтів в точках 571 і 579, які мають локальні мінімуми в зонах абсорбції нафти в межах довжин хвиль 1730 і 2310 нм, і для зіставлення – спектри відбиття сухого ґрунту в точці 578 та зволоженого суглинку в точці 583, які не виявляють специфічних характеристик абсорбції нафти у вигляді локальних мінімумів у межах згаданих вище довжин хвиль.

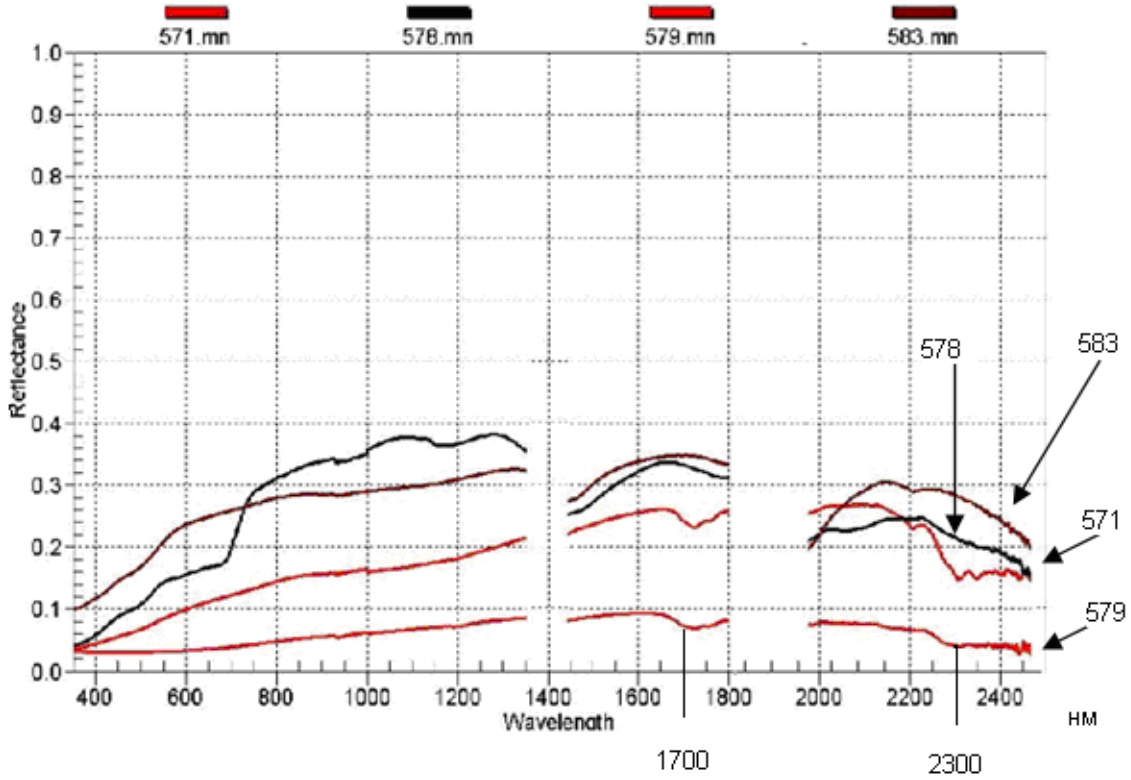


Рис. 4.21. Зіставлення спектрів відбиття нафтонасичених ґрунтів (точки 571, 579), сухого ґрунту (точка 578) та зволоженого суглинку (точка 583) над нафтовим родовищем

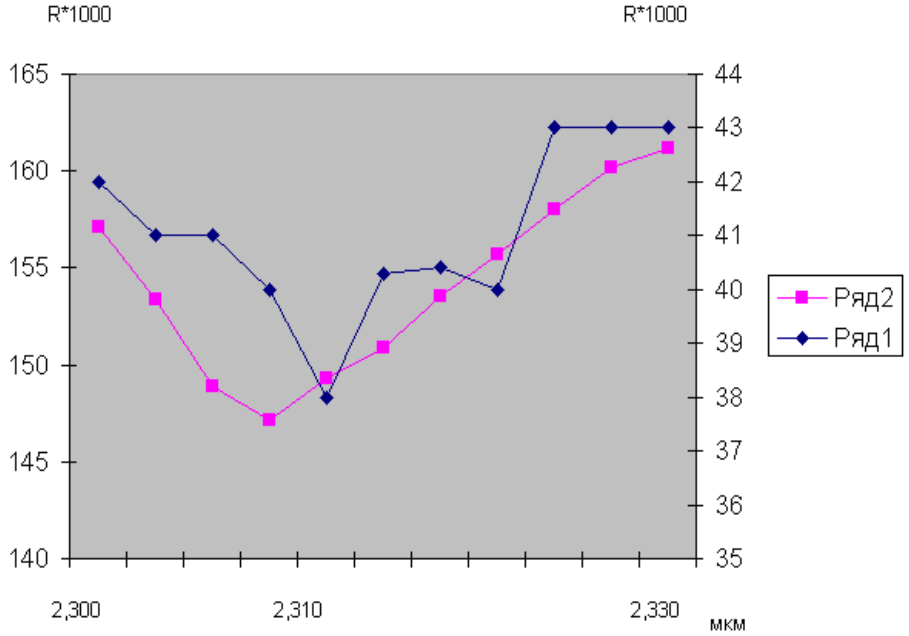


Рис. 4.22 Зіставлення збільшених у 1000 разів графіків зміни спектрометричних коефіцієнтів відбиття нафтонасичених ґрунтів у SWIR-області спектра в межах довжини хвилі 2310 нм: ряд 1 – фрагмент спектра в точці 579; ряд 2 – фрагмент спектра в точці 571

Перевірка наявності характеристик абсорбції нафти у вигляді локального мінімуму спектра в межах довжин хвиль 1700 та 2300 нм є важливим і необхідним кроком при обчисленні гіперспектральних індексів.

В роботі [28] запропоновано вуглеводний індекс HI (Hydrocarbon Index) для визначення нафтовмісних та забруднених нафтопродуктами ґрунтів, який визначається за формулою:

$$HI = (\lambda \quad - \lambda \ ) \frac{R_C - R_A}{\lambda \quad - \lambda} + R_A - R_B \, , \tag{4.18}$$

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 таку умову:

$$R_B < R_A \text{ та } R_B < R_C \, . \tag{4.19}$$

Якщо значення HI > 0 і виконується умова (4.19), то це є показником наявності нафти у ґрунті.

Другий вуглеводний індекс HD (Hydrocarbon Detection) в роботі [80] запропоновано для локальних мінімумів спектрів відбиття в межах довжини хвилі 2310 нм.

Зазначимо, що обчислення індексу HD залежить від сенсора, яким вимірюють спектри відбиття наземного покриву. Так, в роботі [28] для даних спектрометрування сенсором *AVIRIS*, ширина каналів якого становить 10 нм, локальний мінімум характерної особливості в зоні абсорбції нафти проявляється на довжині хвилі 2300 нм, а для спектрів відбиття нафтонасиченого ґрунту спектрорадіометром FieldSpec3FR точка локального мінімуму проявляється на довжині хвилі λ = 2310 нм. Тому формула для обчислення значень HD у нашому дослідженні відрізняється від формули для обчислень цього ж індексу за даними аерознімання сенсором *AVIRIS*.

В даній роботі значення HD обчислюються за формулою:

$$HD = \frac{R(2290) + R(2330)}{2R(2310)} \, , \tag{4.20}$$

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 (відбувається абсорбція нафти), про що свідчить виконання такої умови:

$$R(2310) < R(2330) \text{ і } R(2310) < R(2290), \quad (4.21)$$

то ґрунт є нафтовмісним, нафтонасиченим або забрудненим нафтою. Якщо ж HD ≤ 1 або HD > 1, але умова (4.21) не виконується, то ґрунт не містить нафтопродуктів.

У табл. 4.15 подано результати обчислень гіперспектральних індексів HI за формулою (4.18) та HD за формулою (4.20) із перевіркою умови (4.21) за даними спектрометрування покриву в 13 точках над нафтовим родовищем. В графі «Перевірка умови (4.21)» «Так» означає що умова (4.21) виконується, «Ні» – не виконується.

Таблиця 4.15

Значення вуглеводних індексів у 13 точках спектрометрування шести різновидів наземного покриву над Приозерним нафтовим родовищем

№ типу покриття	Тип покриття	№ точки спектрометрування	Значення пошукових індексів		Перевірка умови (4,21)
			HD	HI	
1	Нафтонасичений ґрунт	571	1,120	0,007	Так
		579	1,087	0,003	>>
2	Сухий ґрунт	570	1,050	0,004	>>
		578	1,006	–0,003	Ні
		585	1,003	0,000	>>
3	Ґрунт із зрідженою луговою травою над родовищем	580	1,015	0,005	>>
		586	1,017	0,004	>>
		587	1,024	0,005	>>
4	Сухий такирний ґрунт біля свердловини	594	1,007	0,000	>>
5	Бура глина, зволожений суглинок	581	0,998	0,000	>>
		583	0,995	–0,001	>>
6	Калюжа біля свердловини з плівкою нафти	592	1,512	0,000	Так
		593	1,064	0,001	Ні

В табл. 4.16 подано величини коефіцієнтів відбиття наземного покриву в 13 точках за даними спектрорадіометра FieldSpec3FR в межах довжини хвилі λ = 2310 нм, які використано для обчислень індексу HD і перевірки умови (4.21). Дані про виконання умови (4.21) наведено в табл. 4.15.

Таблиця 4.16

Значення коефіцієнтів відбиття на трьох довжинах хвиль в межах локального мінімуму спектра на довжині хвилі 2310 нм

№ типу покриття	Тип покриття	№ точки спектрометрування	R(2220)	R(2310)	R(2330)
1	Нафтонасичений ґрунт	571	0,1683	0,1471	0,1612
		579	0,0434	0,0394	0,0425
2	Сухий ґрунт	570	0,2728	0,2551	0,2626
		578	0,2192	0,2119	0,2071
		585	0,3139	0,3073	0,3030
3	Ґрунт із зрідженою луговою травою над родовищем	580	0,2636	0,2504	0,2448
		586	0,1900	0,1796	0,1752
		587	0,1821	0,1713	0,1688
4	Сухий такирний ґрунт біля свердловини	594	0,4221	0,4143	0,4123
5	Бура глина, зволожений суглинок	581	0,1944	0,1871	0,1781
		583	0,2871	0,2819	0,2742
6	Калюжа поблизу свердловини з плівкою нафти	592	0,0013	0,0008	0,0011
		593	0,0085	0,0042	0,0039

Згідно з даними обчислень індексів HI і HD, наведених в табл. 4.15, в точках 571 і 579 виконується умова (4.21) HI > 0 і HD > 1, що підтверджує нафтонасиченість ґрунту за даними спектрометрування покриву. Аналогічний результат маємо і для точки 570 спектрометрування сухого ґрунту, що свідчить про забруднення його нафтою. Для решти точок сухого ґрунту значення HD > 1, але не виконується умова (4.21), а значення HI ≤ 0, що вказує на відсутність

нафти на поверхні ґрунту. Такий же результат маємо для такирного ґрунту в точці 594. Бура глина і зволожений суглинок в точках 581 і 583 теж не мають ознак нафтовмісних ґрунтів, оскільки HD < 1, HI ≤ 0 і відсутня точка абсорбції нафти. Аналогічна поведінка спектрів відбиття в межах довжини хвилі λ = 2310 нм у точках спектрометрування 580, 586, 587 для ґрунту із зрідженою луговою травою. Цікавими, на нашу думку, є спектри в точках 592 і 593 біля калюжі із плівкою нафти. Для спектра в точці 592 HD = 1,512, HI = 0 і, за даними табл. 4.16, умова (4.21) виконується, що підтверджує наявність характеристики абсорбції нафти в межах довжини хвилі λ = 2310 нм і нафтове забруднення в цій точці. А для спектра в точці 593 індекси HD = 1,060, HI > 0, але умова (4.21) не виконується, тобто характеристика абсорбції нафти в межах довжини хвилі λ = 2310 відсутня. Очевидно, для такого типу покриву використання індексів HI і HD не дає позитивних результатів і потребує подальших досліджень [64].

Ще однією можливістю пошуку ВВ на суходолі є зроблений ***винахід, що належить до нафтогазової галузі*** – пошуку й розвідки покладів ВВ.

Сучасний стан проблеми характеризується тим, що ресурс родовищ, які легко відкривалися, практично вичерпаний і основною тенденцією розвитку ГРР є перехід до розв’язання більш **складних геологічних задач**, пов'язаних з розширенням сировинної бази на промислово-освоєних територіях за рахунок виявлення глибоко залягаючих покладів. Відомий спосіб пошуку покладів ВВ сейсморозвідкою. Фізична основа способу ґрунтується на виявленні явища формування сліду дифузійного потоку над покладами нафти і газу. Недоліками даного способу є висока вартість робіт і досить низький рівень вірогідності результатів пошуку. Пояснюється це тим, що виявлений природний резервуар може виявитися порожнім або бути заповнений глибинними водами. Слід дифузійного потоку зберігається при повному зруйнуванні покладу нафти або газу, тобто спосіб враховує факти не наявності покладу ВВ, а їх вертикальної міграції (руйнування покладу).

Неоднозначність геологічної інтерпретації геофізичних даних приводить до необхідності комплексного вирішення проблеми, тобто оптимального

поєднання ряду геофізичних, геологічних, геохімічних, аерокосмічних методів і бурових робіт. Науковою основою такого поєднання є відкриття аномальних явищ, які спостерігаються в геофізичних, геохімічних і, що особливо суттєво для способу, який пропонується, в біохімічних полях над покладами ВВ [65].

Вплив аномальних полів на рослинність спричиняє зміни у біохімічному складі листяного покриву. Відомо, що рослини негативно реагують на наявність в ґрунті, повітрі навіть малих доз токсичних речовин, у тому числі під впливом геохімічних аномалій, і у відповідь на дію несприятливих і шкідливих факторів середовища передусім змінюється біохімічний стан рослинності. При посиленні або тривалій негативній дії розвиваються біохімічні аномалії. Потім пошкодження розповсюджуються на клітинний рівень, і лише після цього при значному посиленні негативної дії розвиваються видимі ознаки пошкодження – хлорози і некрози тканин листа, які викликані змінами змісту пігментів (антоціанів), далі відбувається обпадання листа деревних рослин, гальмування зростання. Таким чином, рослини виконують індикаторну функцію (фітоіндикація). Відмінності в біохімічному стані деревних рослин під дією навіть незначних природних і техногенних аномалій виявляються в оптичних властивостях листя. Лист вищої рослини є складною оптичною системою, що володіє здатністю ефективно використовувати сонячну енергію за рахунок тонко організованої і динамічної структури з можливістю направленої зміни у вмісті пігментів у листі, здібностями до ефективної утилізації енергії сонячного випромінювання і пристосування до дії цього випромінювання в найрізноманітніших екологічних ситуаціях [66].

Відомий мультиспектральний структурно-польовий спосіб прогнозування покладів нафти і газу [67], що базується на наявності генетичного зв’язку ландшафтів з розташованими під ними покладами ВВ, в якому сукупно з аналізом аномалій у висотному полі ландшафтів використовуються явища зміни характеристик спектрів відбиття деревинної і трав'яної рослинності під дією біохімічних аномалій над покладом. Для більш точного визначення межі покладів проводиться наземне спектрометрування контактним способом листя

дерев спектрофотометрами в лабораторних або польових умовах. Недоліками цього способу оптичної спектрометрії листя дерев є:

1. Низька чутливість результатів до малих проявів геохімічних і біохімічних аномалій, які визначаються за спектральними яскравостями методами факторного аналізу і не враховують закономірності організації структури оптичної системи листя і змін у структурі в зоні аномалій.

2. Необхідність отримати еталон спектрограм листя з аномальної ділянки. Такий підхід передбачає наявність аномальної ділянки в зоні пошуку і знання його координат, що значно обмежує сферу застосування даного способу.

Відомий спосіб картування границь покладів ВВ із застосуванням даних ДЗЗ та наземного спектрометрування РП [68], за яким уздовж вибраного маршруту району можливих покладів ВВ, наряду з іншими вимірюваннями, виконується наземне спектрометрування зразків рослинності і за критерієм статистичного розділення спектрограм визначаються границі покладу. Цей спосіб, також як і його аналог [67], для виявлення аномалій використовує загальні імовірнісні методи розділення спектрограм рослинності, що виконується після проведення всієї множини вимірів за маршрутом. Спосіб не містить безпосередньо вимірюваного показника міри забруднення території, не враховує закономірності в змінах структури оптичної системи рослин; як наслідок перерахованих недоліків спосіб має низьку чутливість і оперативність до виявлення геохімічних аномалій.

Способи усунення цих недоліків представлені в запропонованому винаході: 1. Враховувати закономірність в організації оптичної системи листя дерев і прояв цієї закономірності як ефекту змін фрактальної структури спектрограм листяного покриву під впливом геохімічних і біохімічних аномалій. 2. Ввести безпосередньо вимірюваний засобами спектрометрування фітоіндикаційний показник, заснований на ефекті цілеспрямованої зміни дробової фрактальної розмірності спектрограм листяного покриву під впливом геохімічних і біохімічних чинників середовища.

Теоретичні передумови способу, що пропонується, базуються на таких положеннях:

- фізіологічний стан рослин та їхні оптичні характеристики визначаються сукупністю факторів навколишнього середовища. Такими факторами є аномальні геологічні, геофізичні, геохімічні і біохімічні поля у межах ВВ;

- наявність ефекту цілеспрямованої зміни фрактальної розмірності спектрів відбиття РП під дією факторів зовнішнього середовища [69];

- методах визначення фрактальної розмірності природних об'єктів як розмірності Хаусдорфа [70].

Виявлення аномалії природного або антропогенного походження способом фрактальної спектрометричної фітоіндикації виконується в наступній послідовності:

1. Спектрометрування листяного покриву. На контрольованій ділянці виконується спектрометрування 16 листів деревної рослинності одного типу. Спектрометрування виконано контактним способом для кожного листа окремо у видимій частині оптичного діапазону за допомогою прецизійного польового спектрометричного приладу, що допускає спектральну розрізненність в каналах від 1-4 нм. Результат спектрометрування РП фіксується у вигляді 16 спектрограм листів.

2. Створення спектрограм листяного покриву ділянки. Спектрограма листяного покриву створюється як об'єднання по стовпцях 16 електронних таблиць спектрограм окремих листів. У рядках таблиць розташовані номери каналів, у стовпцях – номери спектрограм листів. Кожен елемент таблиці містить значення спектральної яскравості. Створена таким чином електронна таблиця – це двовимірний масив спектральної яскравості, розподіленої по каналах приладу для листяного покриву.

3. Визначення фрактальної розмірності спектра за фрагментом спектрограми листяного покриву.

4. Визначення фітоіндикаційного показника. При переході з чистих ділянок на аномальні спостерігається скачок показника на 15 і більше значень

одиниць шкали виміру, що складає не менше від можливого інтервалу змін фітоіндикаційного показника для листяних покривів і слугує індикатором входження в аномальну зону (додаток Ж) [71].

Висновки до четвертого розділу

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

2. 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. Відносно невеликі значення коефіцієнтів варіації досліджених вегетаційних індексів червоного краю свідчать про порівняно незначну строкатість їх значень, а отже, про подальшу доцільність їх використання для вивчення особливостей відбиття РП та зіставлення з аналогічними індексами, розрахованими за КЗ.

2. **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.

3. Розбіжності між ВІ, розрахованими за даними *Sentinel-2* та FieldSpec3FR, залежать від фази розвитку рослин, зокрема ОП: впродовж вегетації коефіцієнти кореляції між ними зростають для посівів обох досліджених сортів. Досліджені індекси демонструють різну поведінку в залежності від стану РП, що дозволяє рекомендувати їх у подальшому для застосування при вивченні продуктивності виробничих посівів ОП, і, вірогідно, інших сільськогосподарських культур.

4. **Вперше** проведено дослідження наявності аномалій індексів червоного краю REP та TCI, обчислених за гіперспектральними даними спектрометрування пшениці над покладом ВВ Глібовського **газового родовища** спектрорадіометром FieldSpec3FR. 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**.

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

6**. Вперше** проведено дослідження вуглеводних індексів HI та HD у SWIR-області спектрів відбиття за даними спектрометрування наземного покриву спектрометром FieldSpec3FR. Вивчено наземний покрив над нафтовим родовищем Приозерне спектрометром FieldSpec3FR з метою виявлення нафтонасичених та забруднених нафтою ґрунтів без РП.

7. **Зроблено винахід,** що належить до нафтогазової галузі – пошуку й розвідки покладів ВВ. 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 ВВ. Підтверджено патентом України на винахід **№ 104340.**

Список використаних джерел до четвертого розділу

1. Попов М.А. Методология оценки точности классификации объектов на космических изображениях. *Пробл. управления и информатики*. 2007. № 1. С. 97-103.
2. Anderson J.R., Hardy E.E., Roach J.T., Witmer R.E. Land Use and Land Cover Classification System for Use with Remote Sensor Data. *Geological Survey Professional Paper 964*. Washington: United States Government Printing Office, 1976. 41 p.
3. Bossard M., Feranec J., Otahel J. CORINE Land Cover Technical Guide. Technical Report. European Environment Agency. Addendum, 2000. http://www.epa.iedownloadsdatacorinedataEPA_Corine_technical_guide_update_2000. pdf.
4. Büttner G., Feranec J., Jaffrain G. The CORINE Land Cover 2000 Project. *EARSeL Proceedings*. 2004. Vol. 3. P. 331-346.
5. Zadoks J.C., Chang T.T., Konzak C.F. A Decimal Code for the Growth Stages of Cereals. *Weed Res*. 1974. Vol. 14, № 6. P. 415-421.
6. CORINE Land Cover. Pt. 2: Nomenclature: Commission of the European Communities of European Environmental Agency. January 1995. http://reports.eea.eu.in COR0-landcover en.
7. Изменение земных систем в Восточной Европе: Лялько В.И. (отв. ред.). Киев, 2010. 582 с.
8. Earth Systems Change over Eastern Europe: Coeditors P., Lyalko V. (Eds.). Kiev: Akademperiodyka, 2012. 488 p. ISBN 978-966-360-195-3.
9. 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.

10. Ustin S.L., Gitelson A.A., Jacquemoud S., Schaepman M., Asner G.P., Gamon J.A., Zarco-Tejada P. Retrieval of foliar information about plant pigment systems from high resolution spectroscopy. *Remote Sens. Environ*. 2009. Vol. 113, Supplement 1 (Imaging Spectroscopy Special Issue). P. S67-S77.
11. Biewer S., Erasmi S., Fricke T., Wachendorf M. Prediction of yield and the contribution of legumes in legume-grass mixtures using field spectrometry. *Precision Agriculture*. 2009. Vol. 10, № 2. P. 128-144.
12. Eitel J.U.H., Long D.S., Gessler P.E., Smith A.M.S. Using in-situ measurements to evaluate the new RapidEye™ satellite series for prediction of wheat nitrogen status. *Int. J. Remote Sens*. 2007. Vol. 28, № 18. P. 4183-4190.
13. Herrmann I., Pimstein A., Karnieli A., Cohen Y., Alchanatis V., Bonfil D.J. LAI assessment of wheat and potato crops by VENμS and Sentinel-2 bands. *Remote Sens. Environ*. 2011. Vol. 115, № 8. P. 2141-2151.
14. Яценко В.А., Кочубей С.М., Хандрига П.А., Донец В.В., Семенив О.В. Новый метод дистанционного оценивания содержания хлорофилла в растительности и его программно-аппаратная реализация. *Косм. наука і технологія*. 2007. Т. 13, № 3. С. 35-44.
15. Yatsenko V., Kochubey S., Donets V., Kazantsev T. Hardware software complex for chlorophyll estimation in phytocenoses under field conditions. *Proc. of SPIE*. 2005. Vol. 5964. P. 267-270.
16. Донець В.В. Обґрунтування структури апаратурно-програмного комплексу для дистанційного зондування рослинності в польових умовах: автореф. дис. … канд. техн. наук. Київ, 2010. 22 с.
17. 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.
18. 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*. 2010. Т. 16, № 6. С. 5-10.

19. Horler D.N.H., Dockray M., Barber J. The red edge of plant leaf reflectance. *Int. J. Remote Sens*. 1983. Vol. 4. P. 273-288.
20. Dash J., Curran P.J. The MERIS terrestrial chlorophyll index. *Int. J. Remote Sens*. 2004. Vol. 25. P. 5403-5413.
21. Gitelson A.A., Merzlyak M.N. Spectral reflectance changes associated with autumn senescence of Aesculus hippocastanum L. and Acer platanoides L. leaves. Spectral features and relation to chlorophyll estimation. *J. Plant Physiology*. 1994. Vol. 143. P. 286-292.
22. Лэмб Ч.А. Пшеница и ее улучшение. Москва: Колос, 1970. С. 228-230.
23. Моргун В.В., Литвиненко В.Ф. Мутационная селекция пшеницы. Киев: Наук. думка, 1995. 627 с.
24. Соколовская-Сергиенко О.Г., Киризий Д.А. Углекислотный газообмен и активность супероксиддисмутазы флаговых листьев различных сортов озимой пшеницы. *Вісн. Укр. т-ва генетиків і селекціонерів*. 2010. Т. 8, № 1. С.46-50.
25. 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.
26. 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. *Кос. наука і технологія*. 2012. Т. 18, № 4. С. 45-51.
27. Van der Werff H.M.A., Noomen M.F., van der Meijde M. Use of hyperspectral remote sensing to detect hazardous gas leakage from pipelines. *New Developments and Challenges in Remote Sensing*: Bochenek Z. (Ed.). Rotterdam: Millpress, 2007. P. 707-714.

28. Li L., Ustin S.L., Lay M. Application of AVIRIS data in detection of oil-induced vegetation stress and cover change at Jornada, New Mexico. *Remote Sens. Environ*. 2004. Vol. 94. P. 1-16.

29. Noomen M.F., Skidmore A.K., van der Meer F.D. Detecting the influence of gas seepage on vegetation using hyperspectral remote sensing. *3th EARSel Workshop on Imaging Spectroscopy* (Herrsching, Germany, 13-16 May 2003). Herrsching, 2003. P. 252-256.

30. Noomen M.F. Hyperspectral reflectance of vegetation affected by underground hydrocarbon gas seepage: Ph.D. Dissertation / International Institute for Geo International Science and Earth Observation. Enschede, the Netherlands (ITC), 2007. № 145. 167 p.

31. Noomen M.F., van der Meer F.D., Skidmore A.K. Hyperspectral remote sensing for detecting the effects of three hydrocarbon gases on maize reflectance. *Global monitoring for sustainability and security*: Proc. of the 31st Int. Symp. on Remote Sensing of Environment (Saint-Petersburg, 20-24 June 2005). Saint-Petersburg, 2005. P. 4.

32. Rahman F., Gamon John A., Fuentes David A., Roberts Dar A., and Prentiss Dylan. Modeling spatially distributed ecosystem flux of boreal forest using hyperspectral indices from AVIRIS imagery. *Abdullah journal of geophysical research*. December 27, 2001. Vol. 106, № d24. P. 33,579-33,591.

33. 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.

34. Legal notice on the use of Copernicus Sentinel Data and Service Information. https:// sentinels.copernicus.eu documents 247904 690755.
Sentinel Data Legal Notice. SENTINEL-2 User Handbook. https:// earth.esa.int documents 247904 685211 Sentinel-2_User_Handbook

35. https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi

36. Radoux J., Chomé G., Jacques D. Sentinel-2's Potential for Sub-Pixel Landscape Feature Detection. *Remote Sens*. 2016. Vol. 8, № 6. P. 488-516.

37. Clevers J.G.P.W., Gitelson A.A. Using the red-edge bands on Sentinel-2 for retrieving canopy chlorophyll nitrogen content. *First Sentinel-2*: Preparatory symposium (ESRIN, Frascati, Italy, 23-27 April 2012). Frascati, Italy, 2012. Vol. 707. P. 8.

38. Zarco-Tejada P.J., Berjon A., Lopez-Lorano R. Assessing vineyard condition with hyperspectral indices: Leaf and canopy reflectance simulating in a row-structured discontinuous canopy. *Remote Sens. Environ*. 2005. Vol. 99, № 3. P. 271-284.

39. Dotzler S., Hill J., Buddenbaum H. The Potential of EnMAP and Sentinel-2 Data for Detecting Drought Stress Phenomena in Deciduous Forest Communities. *J. Stoffels Remote Sens*. 2015. № 7. P. 14227-14258.

40. Filella I., Peñuelas J. The red edge position and shape as indicators of plant chlorophyll content, biomass potential for land applications. *Int. J. Remote Sens*. 1994. Vol. 15, № 7. P. 1459-1470.

41. Smith K.L., Steven M.D., Colls J.J. Use of hyperspectral derivative ratios in the red-edge region to identify plant stress responses to gas leak. *Remote Sens. Environ*. 2004. Vol. 92, № 2. P. 207-217.

42. Иванова В.М., Калинина В.Н., Нешумова Л.А. Математическая статистика. 2 изд., перераб. и доп. Москва: Высшая шк., 1981. 368 с.

43. 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.

44. Mc. Coy R.M., Scott L.F., Hardin P. The spectral responce of sagebrush in areas of hydrocarbon production. *Proc. of Seventh Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology*. Ann Arbor, Michigan: Environmental Research Institute, 1989. P. 751-756.

45. Noomen M.F., Skidmore A.K., van der Meer F.D. The influence of gas pipeline leakade on plant development and reflectance ACRS 2004: *Proc. of the 25th Asian Conf. on Remote Sensing*. Chiang Mai, Thailand, 2004. Vol. 1/2. P. 637-642.

46. Noomen M.F., Smith K.L., Steven M.D., Skidmore A.K., van der Meer F.D. Hyperspectral indices for detecting changes in canopy reflectance as a result of underground natural gas leakage. *Int. J. Remote Sens*. 2008. Vol. 29. P. 5987-6008.

47. Da-Qi Xu, Guo-Qiang Ni, Li-Li Jiang, Yuan-Ting Shen, Ting Li, Shu-Le Ge and Xian-Biao Shu. Exploring for natural gas using reflectance spectra of surface soils Advances. *Space Research*. 2008. Vol. 41, iss. 11. P. 1800-1817.

48. Shportyuk Z.M., Sakhatsky A.I., Sibirtseva O.N. Land cover classification in Ukrainian Carpathians using the MERIS Terrestrial Chlorophyl index and red edge position from Envisat MERIS data. *Remote Sensing: From Pixels to Processes*: Proc. of Mid-Term Sympos. ISPRS (Enschede, the Netherlands, 8-11 May 2006). Enschede, the Netherlands, 2006. P. 353-357.

49. Лялько В.І., Шпортюк З.М., Сахацький О.І., Сибірцева О.М. Класифікація земного покриву Карпат з використанням наземного хлорофільного індексу та позиції червоного краю за даними відеоспектрометра MERIS. *Косм. наука і технологія*. 2006. Т. 12, № 5/6. С. 10-14.

50. Шпортюк З.М., Сибірцева О.М., **Дугін С.С.** Вплив просочування природного газу на наземних хлорофільний індекс та позицію червоного краю спектрів відбиття пшениці над газовим родовищем. *Доп. НАН України*. 2011. № 11. С. 115-119.

51. Лялько В.І., Шпортюк З.М., Сибірцева О.М., **Дугін С.С.**, Воробйов А.І. Дослідження змін вегетаційних індексів для пшениці над газовим родовищем (підземним газосховищем) за даними гіперспектральної зйомки. *Косм. наука і технологія*. 2012. Т. 18, № 2. С. 15-19.

52. 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.

53. 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.

54. Van der Meer F., van Dijk P., Kroonenberg S. Hyperspectral hydrocarbon microseepage detection and monitoring. *Potentials and limitations 2nd EARSel Workshop on Imaging Spectroscopy* (ITC, Enschede, 11-13 July 2000). Enschede, 2000. P. 8.

55. Klein, D., Menz, G. Vegetation Assessment in East Africa using MGVI and Red Edge Position from Envisat MERIS data. *Proc. of the MERIS (A)ATSR Workshop 2005 (ESASP-597)*: Lacoste H. (Ed.) (ESRIN, 26-30 September 2005). Frascati, Italy: Published on CDROM, 2005. P. 44.1.

56. Gitelson, A. and Merzlyak, M.N. Spectral reflectance changes associated with autumn senescence of Aesculus hippocastanum L. and Acer platanoides L. leaves. Spectral features and relation to chlorophyll estimation. *J. Plant Physiology*. 1994. Vol. 143. P. 286-292.

57. Yang H., Zhang J. van der Meer F. Spectral characteristics of wheat associated with hydrocarbon microseepages. *Int. J. Remote Sens*. 1999. Vol. 20, № 4. P. 807-813.

58. Yang H., Zhang J., van der Meer F. Imaging spectrometry data correlated to hydrocarbon microseepage. *Int. J. Remote Sens*. 2000. Vol. 21, № 1. P. 197-202.

59. Атлас родовищ нафти і газу України. Південний нафтогазоносний регіон: Іванюта М.М. (голов. ред.). Львів: Центр Європи, 1998. Т. 6. 222 с.

60. 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.

61. Horler D.N.H., Dockray M., and Barber J. The red edge of plant leaf reflectance. *Int. J. Remote Sens*. 1983. Vol. 4. P. 273-288.

62. Kuehn F., Oppermann K., Hoerig B. Hydrocarbon Index an algorithm for hyperspectral detectson of hydrocarnons. *Int. J. Remote Sensing*. 2004. Vol. 25, № 12. P. 2467-2473.

63. http: rst.gsfc.nasa.gov Sect5 Sect5 5.html

64. Спосіб пошуку покладів вуглеводнів сейсморозвідкою: пат. № 21783А Україна. МПК G01v1/00 G01v1/40. Тимошин Ю.В., Семенова С.Г.; опубл. 30.04.1998.

65. Зорькин Л.М., Карус Е.В., Кузнецов О.Л. Явление парагенезиса субвертикальных зонально-кольцеобразных геофизических, геохимических и биохимических полей в осадочном чехле земной коры. Открытие № 234 от 24.07.1980.

66. Мерзляк М.Н., Гительсон А.А., Погосян С.И. Спектры отражения листьев и плодов при нормальном развитии, старении и стрессе. *Физиология растений*. 1997. Т. 44, № 5. С. 707-716.

67. Мультиспектральний структурно-польовий спосіб прогнозування покладів нафти і газу: пат. № 63073А Україна. МПК G01v9/00, G01s 17/00. Левчик О.І., Перерва В.М., Тепляков М.О., Архіпов О.І., Бусел Г.Ф., Оскан'ян Т.В., Гонтаренко О.В.; опубл. 15.01.2004.

68. Спосіб картування границь покладів вуглеводнів із застосуванням даних дистанційного зондування та наземного спектрометрування рослинного покриву: пат. № 94146 Україна. МПК G01v9/00, G01v11/00. Попов М.О., Станкевич С.А., Архіпов О.І., Титаренко О.В., Кичка О.А.; заявл. 04.08.2009; опубл. 11.04.2011, Бюл. № 7.

69. Артюшенко М.В., Подгородецкая Л.В., Федоровский А.Д. Фрактальный анализ спектрограмм растительного покрова в задачах природопользования. *Доп. НАН України*. 2010. № 8. С. 113-119.

70. Шредер М. Фракталы, хаос, степенные законы. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. 528 с.

71. 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.

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 у 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.

Додаток А

ВИЗНАЧЕННЯ ТА БАЗОВІ ТЕРМІНИ

Геомоніторинг геологічного середовища – система спостережень, збирання, оброблення, передавання, зберігання та аналізу інформації про стан геологічного середовища, прогнозування його змін, розроблення науково обґрунтованих рекомендацій для прийняття відповідних рішень.

Геологічне середовище – частина земної кори (гірські породи, ґрунти, донні відклади, підземні води тощо), яка взаємодіє з елементами ландшафту, атмосферою та поверхневими водами і може зазнавати впливу техногенної діяльності.

Апробація – попередня, передексплуатаційна перевірка в дії теоретично обґрунтованих технічних, наукових, фінансово-економічних програм (проектів) та оцінка ефективності їх практичної реалізації. Перевірка на практиці, в реальних умовах теоретично побудованих методів. Офіційне схвалення, затвердження чого-небудь після випробування, перевірки.

Верифікація – 1) перевірка, емпіричне підтвердження теоретичних положень, розрахункових даних шляхом зіставлення їх із спостережуваними об'єктами, фактичними даними, результатами експериментів; 2) порівняння результатів класифікування зображення з істинними даними про місцевість.

Валідація – оцінювання належним чином якості даних, що одержують на виході системи.

Полігон ДЗЗ – частина земної поверхні з відомими географічними, геодезичними, геологічними, спектральними та іншими характеристиками, яка може бути використана як джерело допоміжних даних при інтерпретації матеріалів ДЗЗ.

Контрольно-калібрувальний полігон (ККП) – частина земної поверхні разом з розташованими на ній об'єктами, яка використовується для верифікації та калібрування технічних засобів ДЗЗ.

Тематичний полігон (ТП) – частина земної поверхні разом з розташованими на ній об'єктами, яка використовується для валідації технологій і продуктів (даних) ДЗЗ. Зазвичай ТП включає в себе ділянки території (тестова ділянка - test sites), які за своїми характеристиками відносяться до різних класів. Номенклатура класів, представлених на такому полігоні, визначається природними умовами території та вимогами до вирішуваних тематичних завдань.

Тестова ділянка – частина земної поверхні (разом з об'єктами, що на ній розташовані) з відомими властивостями або характеристиками. Використовується при контрольному класифікуванні, а також при навчанні експертних систем і систем автоматичного розпізнавання об'єктів.

Додаток Б

ЄВРОПЕЙСЬКА СИСТЕМА КЛАСИФІКАЦІЇ ЗЕМНИХ ПОКРИВІВ (CORINE LAND COVER), АДАПТОВАНА ДО УМОВ УКРАЇНИ

1 клас Штучні поверхні, антропогенні та техногенні території	**1.1** Міська забудова	**1.1.1** Неперервна міська забудова	**1.1.1.1** - Міська забудова, багатоповерхова забудова
		1.1.2 Перервна міська забудова	**1.1.2.1 -** Села, забудовані території, мало поверхові забудови з садибами сараями садами приватними городами
	1.2 Індустріальні, комерційні та транспортні об'єкти	**1.2.1** Індустріальні або комерційні об'єкти	**1.2.1.1** - Сільськогосподарські двори, товарні ферми, СТО, МТС, відстійник
		1.2.2 Дороги, залізничні шляхи та прилеглі території	**1.2.2.1** - Різні типи доріг, віадуки, насипи, відкоси
		1.2.3 Порти, портові області	**1.2.3.1** - Порти, верфі, доки
		1.2.4 Аеропорти, злітні смуги	**1.2.4.1** - Аеропорти, аеропортна забудова, злітні смуги
	1.3 Звалища, карьєри і ділянки будівництва	**1.3.1** Кар'єри	**1.3.1.1** - Кар'єри по видобутку глини, піску, та ін., відвали
		1.3.2 Смітники	**1.3.2.1** - Купи сміття, забруднені території
		1.3.3 Будівельні майданчики	**1.3.3.1** - Майданчики під забудовою
	1.4 Штучно створена зелена рослинність на землях не с/г призначення	**1.4.1** Сквери, парки, зелені зони	**1.4.1.1** - Сквери, парки, газони
		1.4.2 Спортивні майданчики та місця відпочинку	**1.4.2.1** - Спортивні майданчики, бази відпочинку, пансіонати, санаторії, території облаштовані під стоянки для туристів
2 клас Сільськогосподарські землі	**2.1** Орні землі	**2.1.1** Не меліорована орна земля	**2.1.1.1** - Рілля, (однорічні посіви)
		2.1.2 Меліоровані орні землі	**2.1.2.1** - Постійно зрошувана земля - немає
			2.1.2.2 - Осушені орні землі (канали меліорації, сухі торфовища, які розорюються після осушення, оглеєні ґрунти)
		2.1.3 Рисові поля	**2.1.3.1** - Рисові поля
	2.2 Поля під посіви	**2.2.1** Виноградники	**2.2.1.1** - Виноградники
		2.2.2 Фруктові дерева та ягідники	**2.2.2.1** - Фруктові дерева, плодоносні культури
		2.2.3 Оливкові гаи	**2.2.3.1** - Оливкові гаи
	2.3 Пасовища	**2.3.1** Пасовища	**2.3.1.1** - Великі ділянки трав'яної рослинності, що використовуються для випасу худоби
	2.4 Не орні землі	**2.4.1** Однорічні культури, пов'язані з багаторічними культурами	**2.4.1.1** - Сівозміни, однорічні трави
		2.4.2 Складні схеми вирощування	2.4.2.1 -
		2.4.3 Сільськогосподарські землі	**2.4.3.1** - Декілька років не орані, але ще не зарослі кущами, запущені поля під злинкою, вересом
		2.4.4 Агролісомеліорації області	**2.4.4.1** - Поля з лісосмугами
3 клас Лісові напівприродні та природні рослинні покриви	**3.1** Ліси	**3.1.1** Листяні ліса	**3.1.1.1** - Ліси, дуб, граб, клен, липа, тополя
			3.1.1.2 - Ліси - береза, осика
			3.1.1.3 - Мокрі леси - вільха чорна
		3.1.2 Хвойні ліса	**3.1.2.1** - Соснові зрілі ліси, з підліском, зеленомошні чорничні, понад 30 років із зімкнутою кроною

			3.1.2.2 - Молоді плантації насадженої сосни із незамкнутою кроною
			3.1.2.3 - соснові хворі ліси, розріджені
		3.1.3 Ліса мішаного типу	**3.1.3.1** - Різне співвідношення порід листяних і хвойних - сосново-дубові, сосново-березові, сосново-грабово-березові і т.д.
	3.2 Чагарники та трав'яні співтовариства	**3.2.1** Природні пасовища	**3.2.1.1** - Вологі луки, сінокоси
		3.2.2 Торф'яні області та пустош	**3.2.2.1** - Чагарники та кущі. Трав'яниста рослинність на більш сухих ділянках
		3.2.3 Пустинна рослинність	**3.2.3.1** - Перекати поле, колючки
		3.2.4 Лісисто-чагарникова місцевість	**3.2.4.1** - Самостійна або вегетативна молода поросль, лісо-чарагникові ділянки до 50% площі
			3.2.4.2 - Молодий насаджений ліс з не зімкнутою кроною і висотою до 5м, зімкнутість крони до 50% всієї площі
	3.3 Відкриті землі з незначною рослинністю або з її відсутність	**3.3.1** Береги, дюни, піски	**3.3.1.1** - відкриті поверхні еолових горбів та гряд, дюни
			3.3.1.2 - Приозерні піщані вали, пляжі
		3.3.2 Скали які виступають з води	**3.3.2.1** - Скали які виступають з води
		3.3.3 Ділянки рідкої рослинності	**3.3.3.1** - Деградована рослинність
		3.3.4 Згарища	**3.3.4.1** - Згарища, буреломи
		3.3.5 Льодовики і вічні сніги	**3.3.5.1** - Льодовики і вічні сніги
4 клас Непридатні землі	**4.1** Острівні берегові ділянки	**4.1.1** Внутрішні болота	**4.1.1.1** - Очеретяні болота приозерних частин озер, старічних понижень, давніх меандр, заростаючих озер, в основному на мінеральних ґрунтах
			4.1.1.2 - Болота трав'яні, порослі осоками, малівією та ін. гідрофітами, низинні, мезотрофні.
			4.1.1.3 - Болота порослі деревно-чагарниковою рослинністю, лісові болота
		4.1.2 Торфяні болота	**4.1.2.1** - торфовища, мохові болота та ділянки, після видобування торфу - западини заповнені водою
			4.1.2.2 - Торфовища пересушені
	4.2 Берегові водяні ділянки	**4.2.1** Солончаки	**4.2.1.1** - Поверхнево заводнені солоні землі
		4.2.2 Лимани	**4.2.2.1** - Затоплені пригирлові частини річки (заболочені)
		4.2.3 Заливні території	**4.2.3.1** - Заливи
5 клас Водні поверхні	**5.1** Внутрішні водойми	**5.1.1** Ріки	**5.1.1.1** - Річки, струмки
			5.1.1.2 - Канали
		5.1.2 Озера, водойми	**5.1.2.1** - Прибережні мілководдя й острівні мілини (за рослинність і без неї)
			5.1.2.2 - Дзеркало води, чиста вода, глибина
			5.1.2.3 - Деградуючі озера (заростаючи)
	5.2 Морські води	**5.2.1** Прибережні лагуни	**5.2.1.1** - Мілководні частини моря (океану)
		5.2.2 Естуарії	**5.2.2.1** - Лійкоподібні гирла річок
		5.2.3 Моря та океани	**5.2.3.1** - Моря та океани

Додаток В

ПЕРЕЛІК ЕТАЛОННИХ ДІЛЯНОК ШАЦЬКОГО ПОЛІГОНУ ДДЗ

Номер еталона	Клас	Назва
1	2.3.4	Перелоги
2	3.1.2б	Сосновий лишайниковий ліс
3	3.1.1б	Вільховий вологий ліс
4	4.1.1.в	Лісове болото
5	3.3.3	Суха трав'яна лука з розрідженою рослинністю
6	3.2.1	Волога трав'яна лука
7	3.1.2.а	Сосновий чорницево-зеленомоховий ліс
8	3.2.1	Трав'яні луки щучниково-молінієві
9	2.1.1	Агроценози, орні землі
10	3.2.1в	Волога торфовиста трав'яна лука
11	4.1.1а	Болото мезотрофне трав'яно-осокове
12	4.1.1а	Болото мезотрофне, пушицево-осокове
13	4.1.1а	Болото прибережно-очеретяне
14	3.3.1а	Піщана гряда, слабозаросла сосною культивованою
15	4.1.2	Болото оліготрофне, журавлиново-сфагнове
16	3.1.2 а	Сосновий чорницево-зеленомоховий бір
17	2.3.4	Перелоги
18	3.3.1- 3.4	Сосновий ліс - бурелом - вирубка - посадка сосново-березового лісу
19	2.1.1	Агроценози, орні землі
20	3.1.1а	Ліс дубовий сирий
21	3.1.2а	Сосновий зеленомохово-чорницевий ліс
22	3.2.4 б	Сосновий молодий культивований ліс
23	2.3.	Пасовище на вологих торфових луках
24	2.3.4	Торфові луки під сінокосами, городами
25	3.3.3-3.3.4	Торфові луки після пожежі

Додаток Г

ПАСПОРТ ЕТАЛОННОЇ ДІЛЯНКИ № 11

Полігон Шацький	***Країна*** Україна
Номер тестової ділянки № 11	***Код за CORINE LC*** 4.1.1.

Назва класу за CORINE LC болото мезотрофне

Топографічне положення (прив'язка до місцевості) на північ від Шацька, праворуч від дороги на с. Мельники, болото між озерами Озерце і Карасинець

План овал

Характерність ділянки заболочена ділянка з евтрофними озерами в центрі

Тип використання непридатні землі

Номери елементів, їх координати та розташування

Номер елементу	***Широта***	***Довгота***	***Положення елементу на місцевості та час спостереження***
329	[redacted]		
332			
333			
500			

ЕКОЛОГІЧНИЙ ОПИС

Абсолютна відмітка поверхні 167 м

Нахил поверхні: незначний в сторону озерної котловини

Геоморфологічний рівень: озерно-алювіальна поверхня

Форма рельєфу: озерна улоговина

Приповерхнева геологія: озерно-алювіальні відклади, перекриті з поверхні біогенними (хемогенними)

Ґрунти болотні, торфово-болотні

Вологість: перезволожена ділянка, вода на поверхні

Гідрологічний режим: частково зарегульований, існує підпір ґрунтових вод

Опис рослинності: осоки – шершава (*Carex hirta*), чорна (*Carex nigra*), осока гостра (*Carex acuta*), осока лисяча (*C. vulpina*), осока омська (*Carex omsciana Meinsh*) пухівка піхвова (*Eriophorum vaginata*), широколиста *(E. latifolium*) та багатоквіткова (*E. polystachion*), сабельник (Comarum palustre), ситники (*Juncus compresus, J. bufonies, J. effus*), плакун-трава верболиста (*Lythrum salicaria*).
По профілю рослинність змінюється в залежності від рівня вологості і якості грунтів. Деградована злаково-різнотравна лука, що використовується під випас (домінує тонконіг лучний (*Poa pratensis*), як субдомінанти трапляються конюшина повзуча (*Trifolium repens*), кульбаба лікарська (*Taraxacum officinale*), стокротки багаторічні (*Bellis perenis*), в більш понижених ділянках змінюється злаково-осоковою сирою лукою, де домінують злаки –

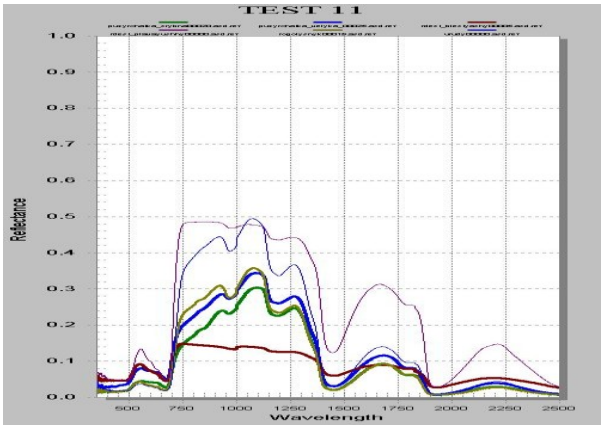
тонконіг лучний, костриця лучна (*Festuca pratensis*), осоки – шершава (*Carex hi*rta), чорна (*C. nigra*), та різнотрав'я: жовтеці (*Ranunculus polyanthemus*) та повзучий (*R. repens*), конюшина повзуча, коронарія зозуляча (*Coronaria flos– cuculi*), перстач гусячий (*Potentilla anserina*) та перстач прямостоячий або калган (*P. erecta*), сідач коноплевий (*Eupatorium cannabinum*). Із підвищенням рівня води – заболочена лука з домінуванням ситників та плакун-трави верболистої переходить в мезотрофне пухівково-осокове болото.

Екологічна характеристика: болото евтрофне і мезотрофне, крупноосокове. Є меліораційні канави. По краю болота лучна рослинність, частково під пасовищем (смуга шириною 20-50 м), ближче до озера і меліораційних канав збільшується обводненість, заболочення (осока, пухівка), в перехідній зоні – мочкуватість (ситник). Під ногами виступає вода на 5-10 см з поверхні. Ближче до озера – рідколісся берези пухнастої та кущі верби вухастої.

Через широкомасштабну меліорацію рослинні угруповання пухівково-осокових боліт сьогодні знаходяться на межі зникнення і потребують охорони. Є місцями зростання цілої низки цінних лікарських та червонокнижних видів рослин, зокрема поліських орхідей.

***Опис змін за час спостережень**:* не відмічено

Фото тест сайту: _____



Додаток Д

ШАЦЬКИЙ ПОЛІГОН

Місцезнаходження. Полігон розташований в межах Шацького Національного природного парку (ШНПП), який знаходиться в північно-західній частині Волинської області, на території Шацького адміністративного району (див. рисунок).

Протяжність території ШНПП з півночі на південь – 32 км, із заходу на схід – 36 км. На заході територія парку межує з Польщею (протяжність кордону 10 км) і Білоруссю (6 км), на півночі – з КСП “Заозерне”, КСП “Заповіт” і Білоруссю, зі сходу – з КСП “Прип’ять”, з півдня – з КСП “Перемога” і Любомльським районом.

Схема розташування ШНПП

ШНПП створено згідно Постанови РМ УРСР № 533 від 28 грудня 1983 р. та наказу МЛГ УРСР № 64 від 16 березня 1984 р. за рахунок площ лісів Шацького учбово-дослідного лісгоспзагу і земель колгоспів Любомльського району. При цьому в постійне користування ШНПП зі складу Шацького учбово-дослідного лісгоспзагу було передано 6959 га, зі складу колгоспів – 5051 га. Згідно з наказом Волинського облупрлісгоспзагу № 75 від 2 квітня 1984 р. площа земель, які були передані зі складу учбово-дослідного лісгоспзагу, була уточнена і склала 6 971 га. Таким чином, на час організації парку його площа, яка знаходилась в безпосередньому користуванні парку, сягала 12 022 га.

У відповідності до Указу Президента України від 16.08.1999 р. № 992/99 “Про розширення території Шацького національного парку”, до складу парку ввійшло 16 166,6 га земель без вилучення, в тому числі 11 200 га земель Шацького держлісгоспу; 27 56,8 га – КСП ім. Богдана Хмельницького; 20,3 га – КСП “Прип’ять”; 187,1 га – КСП “Україна”; 1107,6 га – ДГ “Світязь”; 98,4 га – інших землекористувачів; 618,6 га – земель сільських населених пунктів, 162,2 га – земель запасу та 16,2 га – фермерських господарств. Таким чином, в 1998 р. загальна площа парку склала 48 976,6 га.

Загальні фізико-географічні умови території. Згідно фізико-географічного районування територія досліджень відноситься до зони змішаних лісів Волинського Полісся. Загальний опис фізико-географічних умов даного регіону виконано на основі польових експериментальних досліджень, багатьох фахових робіт і літературних джерел.

Кліматичні особливості. Клімат – помірно-континентальний, з м’якою зимою і відносно теплим та вологим літом. Західне положення території сприяє вторгненню морських і полярних мас, а місцеві кліматоутворюючі фактори, зокрема низинний характер території і велика кількість озер і боліт, сприяють

формуванню мікрокліматичних особливостей, що наближаються до помірно-морського клімату Західної Європи.

За даними метеорологічної станції Світязь, середньорічна температура становить +7,5°С, максимальна температура повітря у липні – +18,8°С, а мінімальна у січні – (–4,4°С). Амплітуда температур за рік сягає 22,8°С.

Період активної вегетації наступає з третьої декади квітня і продовжується до кінця вересня.

Середньорічна відносна вологість повітря становить 78%. Для території досліджень характерний континентальний тип річного ходу опадів з максимумом у літні місяці (67–70 мм) та мінімумом у січні – березні (25–27 мм). В середньому за рік випадає 500 мм опадів. На теплий період припадає 71% річної кількості опадів. Майже кожен рік можна очікувати близько 150 днів з опадами (41% кількості днів у році) і 60 днів зі слідами опадів. Середня багаторічна величина випаровування з поверхні озер залежить від характеру озерної улоговини та навколишніх ландшафтів території і коливається від 60,2 до 913,3 мм за безльодоставний період.

Стійкий сніговий покрив з’являється на початку грудня та утримується в середньому впродовж 76 днів на рік. В 24% зим стійкий сніговий покрив може не утворюватись, а в деякі зими він може утворюватись двічі. Висота снігового покриву протягом зими коливається від 2 до 3 см у грудні, до 7–13 см у січні - лютому. Найбільша середня висота снігового покриву становить 11 см, а максимальна – 32 см. Щільність снігового покриву протягом зими змінюється від 0,20 до 0,28 г/см^3, а запас води в сніговому покриві дорівнює 12–21 мм. Середній найбільший запас води за зиму становить 34 мм, а глибина промерзання ґрунтів – 20–25 см.

Територія району знаходиться під дією повітряних мас Атлантики, Арктичного басейну і континентальних просторів Євразії. Тому переважаючими впродовж року є вітри західного і північно-західного

напрямків. Середня річна швидкість вітру досягає 2,8 м/с. Ймовірність швидкості вітрів понад 4 м/с протягом року становить 39,5%, а швидкість вітрів більше ніж 15 м/с – 1%.

Територія характеризується значними рекреаційними кліматичними ресурсами. Період з комфортною температурою вище 15°С починається з другої половини травня і триває 106–120 днів. Найбільш сприятливим періодом для організації літніх видів відпочинку і кліматотерапії є червень–серпень, а зимових – січень–лютий.

В цілому, клімат району сприяє інтенсивному рельєфоутворенню, формуванню лісової, лучної і болотної рослинності, багатоцільовому господарському використанню території та широкому розвитку рекреації.

Геоморфологічні умови та ландшафти. Територія полігону розташована в межах поліської частини Волинської області та являє собою рівнину, що поступово знижується з півдня на північ і північний схід.

Сучасний рельєф, ґрунти та інші елементи географічного середовища зумовлені антропогенними відкладами, утворення яких пов’язують з давнім зледенінням. До них належать морени, валуни, різні глини і мергелі, суглинок, пісок, лес, галечник. Річкові води, розмиваючи морену у поліській частині території області, утворили піщані поля, так звані зандрові піски.

Поверхня поліської частини області являє собою слабо хвилясту рівнину. Одноманітність рельєфу порушують лише крейдяні горби з дуже пологими схилами. Вони підвищуються над місцевістю до 30–40 м і досягають в поперечнику кількох десятків кілометрів. Абсолютні висоти Західного Полісся від 190 до 200 м на півдні і до 150 м на півночі біля Прип’яті. Характерна риса рельєфу Полісся – незначна відносна висота і невеликий нахил на північ. Це зумовлює повільну течію рік, незначну зрізаність їх русел і мало виражені долини. Річкові долини Прип’яті, Стиру, Стоходу, Турії та інших рік серед навколишньої місцевості майже непомітні. Їх заплави і надзаплавні тераси

мають незначну висоту. Вздовж рік простягаються лише алювіальні відклади у вигляді невисоких піщаних горбів і пасм.

Територія досліджень представлена ландшафтами з переважанням заболочених заплав, слабодернованих межиріч з переважанням чорновільхових і дубово-соснових лісів та орних земель на дернових, лучних і дерново-середньопідзолистих ґрунтах та місцевостей кінцево-моренних горбів, вкритих змішаними лісами.

Долина р. Прип’ять дуже слабо виражена в рельєфі і по всій території Волинської області геологічно простягається переважно уздовж регіонального Ратнівського розлому. Поблизу гирл річок Турія, Вижівка і Стохід долина річки також перетинається поперечними до русла глибинними розломами. Геологічна будова і склад крейдових і четвертинних відкладів обумовлюють гідрогеологічні і гідрологічні умови, форму річища, заболоченість заплави річки і надзаплавних терас, хімічний склад і рівні підземних вод, а отже, і формування біоценозів в її басейні.

Гідрографія. Район полігону знаходиться в основному в межах Волинської області, де нараховується 67 річок загальною довжиною 1240 км, які протікають переважно з півдня на південь, мають повільну течію, що обумовлено незначними нахилами поверхні (0,27–0,4 м/км), а також характеризуються широкими заплавами. Середня густота річкової мережі коливається в межах 0,25–0,47 км. Розподіл стоку річок протягом року нерівномірний, талі води в річному стоці займають в середньому 50–70%. Середній багаторічний стік басейну з 1 км площі сягає 122 тис. м^3/рік, при цьому частка підземного живлення становить 12–32% річного стоку. Густота гідрографічної сітки на Волині в 2 рази більша, ніж у середньому по Україні. Основою цієї сітки є Прип’ять, що протікає своєю верхньою течією по північній частині області з заходу на схід майже паралельно кордону з Білоруссю. У р. Прип’ять з правого боку впадають р. Стир, Стохід, Турія,

Вижівка, які протікають через територію області в основному з півдня на північ.

Під час розвитку меліоративного будівництва в 70–90-х роках XX ст. заболочені і перезволожені площі заплави і тераси р. Прип’ять поблизу населених пунктів були осушені на загальній площі 69 736 га (697,36 км^2), або 6,5% від площі водозбору річки, який дорівнює 10 699 км^2 при залісненні останнього в 22% і заболоченості 38% (4065,62 км^2). Тобто, від загального фонду перезволожених земель тут було осушено 522,2 км^2. Осушені землі використовуються переважно під пасовища, сіножаті і, частково, під ріллю.

Природний розвиток річки, різноманітне антропогенне навантаження поступово сформували умови, за яких різко зменшилась руслоутворююча і водопропускна здатність р. Прип’ять, що особливо проявилося в період високих паводків. Стали неминучими тривалі затоплення великих площ у долині річки, що спричинило евтрофікацію, збільшення продуктів гниття в природних водах, погіршення умов проживання населення тощо.

Ріки в поліській частині течії мають розширені заплави, відсутній чітко окреслений корінний берег. Все це пов’язано із загальним рівнинним характером поверхні і надто малим нахилом її на північ. Вододіли виражені слабо і над рівнем річок підвищуються всього на 10–20 м. Навесні, під час розливів рік, затоплюються значні площі, залишаються тимчасові озера, що сприяють заболоченню території. Так утворюються великі болота в межиріччях, наприклад, між річками Стохід і Стир.

Основним джерелом живлення рік є снігові, дощові та ґрунтові води. За гідрологічним режимом вони належать до типу рік з високою весняною повінню. В області повені бувають у березні і квітні. Ріки скресають в середньому 20–25 березня, найпізніше 8–11 квітня. Слідом за цим спостерігається найвищий рівень води в Прип’яті.

Весняні розливи рік, заливаючи заплави, припиняють сухопутні зв'язки між деякими селами і хуторами, особливо в долині Прип'яті і нижніх течіях її притоків. Тільки в кінці травня вода знову входить у береги. Літній меженний період іноді порушується паводками, які бувають у період липневих та серпневих дощів.

Рослинність. Особливості природних умов обумовлюють і характер розподілу РП території досліджень. Ліси розподілені порівняно рівномірно, часто це суцільні великі масиви, що використовуються місцевим населенням та рекреантами для збору грибів і ягід.

Розподіл лісів території досліджень за категоріями на темнохвойні, світлохвойні, змішані, широколисті, дрібнолисті проведено на основі матеріалів таксації деревостанів, отриманих під час лісовпорядних робіт Комплексною експедицією «Укрдержліспроект» у 2002 р.

До темнохвойних лісів були віднесені насадження ялини європейської, в складі яких супутні породи не перевищують 20%.

Світлохвойні ліси представлені в основному сосною звичайною та в невеликій кількості сосною Банкса. До цієї категорії належать ліси чистих сосняків та насадження сосни, де об'єм супутніх порід (здебільшого насаджень берези повислої, частково дуба звичайного та вільхи чорної) не перевищує 20% складу.

До категорії змішаних лісів віднесені насадження з двох і більше деревних порід, де основна лісоутворююча порода займає в складі насадження 70% і менше.

Категорія широколистих лісів у складі насаджень ШНПП досить незначна і представлена в основному насадженнями дуба звичайного і червоного.

До цієї категорії були віднесені широколисті деревостани, де основна лісоутворююча порода та супутні широколисті породи в складі насадження перевищують 70%.

До категорії дрібнолистих лісів віднесені насадження чистих березняків, вільшняків, осичників, грабняків та змішані насадження вищезгаданих деревних порід, де супутні породи займають до 20% складу деревостану.

За геоботанічним районуванням (Брадіс, Андрієнко, 1977), дана територія належить до Ратнівсько-Любешівського (Верхньоприп'ятського) району з переважанням соснових лісів чорницево-зеленомохових та евтрофних осокових боліт. Вкриті лісовою рослинністю землі займають 50% від загальної площі парку, луки – 14,3%, болота – 4,0%, води – 14,2%. Решта площі знаходиться під орними землями, садибами, трасами. У міжозерних улоговинах зосереджені як евтрофні, переважно осоково-гіпнові, так і мезотрофні болота, зрідка трапляються оліготрофні. Значна частина боліт осушена, частина евтрофних боліт трансформована в торф'янисті луки. Лучна рослинність приурочена до берегів озер, річок.

Серед лісових формацій переважають соснові ліси. Серед них найбільшу площу займають ліси чорницеві (54%), меншу – соснові ліси зеленомохові (13%), ще меншу – соснові ліси лишайникові (2%). Близько 8% території лісових формацій припадає на заболочені соснові ліси. В екологічному ряду найвищі місця (горби, гряди, пасма) з дерново-приховано-підзолистими ґрунтами займає асоціація – соснові ліси кладонієві (*Pinetum cladinosum)*, яка фрагментарно поширена серед соснових лісів зеленомохових. Її деревостан характеризується невисокою зімкненістю (0,6) та низькою продуктивністю (V бонітет). В ньому переважає сосна без домішок інших порід.

Серед лишайникових соснових лісів на підвищеннях рельєфу невеликими ділянками трапляються фрагменти асоціації – соснові ліси ялівцеві – (звичайний) – кладонієві (*Pinetum junipereto – (communi) – cladinosum*), в якій

ялівець звичайний (*Juniperus communis)* утворює підлісок з зімкненістю 0,2–0,4.

Група асоціацій – соснові ліси зеленомохові (*Pineta hylocomiosa*) приурочена до схилів незначних підвищень і положистих ділянок з дерново-слабопідзолистими ґрунтами. Вона представлена кількома асоціаціями, найбільш поширеними з яких є соснові ліси зеленомохові (*Pinetum hylocomiosum*) і чорнично-зеленомохові (*P. Myrtilloso-hylocomiosum*). Перша асоціація характеризується добре розвиненим деревостаном із зімкненістю крон 0,7–0,8, в якому переважає сосна звичайна (*Pinus sylvestris L.*), з домішкою берези повислої (*Betula pendula Roth*). Висота сосен становить 20-22 м, діаметр – 30-32 см. Підлісок відсутній, окремими екземплярами трапляється крушина ламка (*Frangula alnus Mill*).

Нижче в рельєфі розташовуються ценози найбільш поширеної асоціації – соснові ліси чорницево-зеленомохові (*Pinetum myrtilloso–hylocomiosum*), основні площі яких зосереджені в східній частині парку. Дана асоціація формується на вирівняних та знижених ділянках на дерново-підзолистих піщаних, дещо оглеєних ґрунтах. Деревостани цих переважно середньовікових лісів мають зімкненість крон 0,7-0,8 і I – Іа бонітет, їх висота становить 18-20 м, а діаметр сосен – 20-24 см. У деревостані завжди є домішки берези повислої (*Betula pendula*), а також дуба черещатого (*Quercus robur L*). Останній становить близько 5-10% деревостану, але зосереджений, в основному, в другому ярусі, висота якого – 8-10 м.

Дубово-соснові ліси на території парку трапляються зрідка, займають близько 2% площ, вкритих лісовою рослинністю. Вони приурочені до середньопідзолистих супіщаних грунтів і представлені асоціацією – дубово-соснові ліси крушиново-чорницеві (*Querceto-Pinetum franguloso-myrtillosum*). Деревостан одноярусний, його зімкненість – 0,7-0,8, склад 7С2Д1Б+Вільха. У віці 80 років сосна має висоту 23-24 м, дуб, звичайно, на 2 м нижчий. Зімкненість підліску – 0,3-0,4, висота – 3-4 м, утворює його крушина ламка (*Frangula alnus*) із домішкою калини звичайної (*Viburnum opulus* L.).

Трав'янисто-чагарничковий ярус досить густий (60%), у ньому переважає чорниця (*Vaccinium myrtillus*) (30%), із покриттям 1-2% трапляються перестріч гайовий (*Melampyrum nemorosum* L.), веснівка дволиста (*Majanthemum bifolium*), молінія голуба (*Molinia caerulea*), куничник очеретяний (*Calamagrostis arundinacea* (L.)). Невеликими ділянками на території парку трапляються грабово-дубові ліси (0,8%), які зростають на незначних за площею підвищеннях, оточених вільшняками, лісовими сфагновими болотами або сосновими лісами чорницевими. Вони представлені асоціацією – грабово-дубові ліщиново-кислицеві ліси (*Carpineto–Quercetum coryloso–oxalidosum*

Вільхові ліси займають значні площі, вкриті лісовою рослинністю. Їх невеликі ділянки відмічені по всій території, проте трапляються і значні за площею суцільні масиви цих лісів. У рельєфі вільхові ліси розташовані на периферії боліт і в зниженнях серед лісових масивів на торф'янисто-глейових легкосуглинистих ґрунтах. Переважають асоціації – вільхові ліси кропивні (*Alnetum urticosum*) та безщитникові *(A. athyriosum).*

Березові ліси з березою повислою (*Betula pendula*), що біля 15% площі вкриті лісовою рослинністю, трапляються на місці корінних соснових і дубово-соснових лісів.

Болота в межах території досліджень за своїм типом та РП різноманітні. Переважають евтрофні болота, дещо менші площі займають мезотрофні; оліготрофні болота трапляються дуже рідко. Серед евтрофних боліт домінують трав'яні; лісові болота трапляються невеликими ділянками. Лісові евтрофні болота представлені переважно чорновільшняками, з добре виявленою мозаїчністю рельєфу (пристовбурні підвищення та мікрозниження).

Серед трав'яних евтрофних боліт панують осокові, рідше трапляються високотравні. Осокові болота здебільшого представлені формаціями осоки омської (*Cariceta omskianae*), осоки зближеної (*C. appropinquatae*) та осоки здутої (*C. rostratae*). Трав'яні високотрав'яні болота представлені формаціями

куги озерної (*Scirpeta lacustri*), очерету звичайного (*Phragmiteta australis*), рогози вузьколистої (*Typheta angustifoliae*), хвоща річкового (*Equisetata fluviatili*), що є типовим для Західного Полісся.

Мезотрофні болота зосереджені в урочищах. Саме на мезотрофних болотах зростає ряд рідкісних видів флори України, переважно північних, що перебувають тут на південній межі свого ареалу – росянка англійська, росянка проміжна, верба лапландська, осока дводомна, осока тонкокореневищна (*Drosera anglica* Huds., *D. intermedia* Hayne, *Salix lapponum* L., *Carex dioica* L., *C. Chordorrhiza* Ehrh.). Значна частина мезотрофних боліт увійшла до заповідної зони парку.

Луки трапляються фрагментарно (у вигляді невеликих ділянок) на місці зведених лісів і представлені формаціями мітлиці тонкої, пахучої трави звичайної, костриці червоної (*Agrostideta vulgaris, Anthoxantheta odorati, Festuceta rubrae*).

Рослинний покрив території досліджень в цілому характерний для Західного Полісся. Він відзначається мозаїчністю, що обумовлено особливостями геоморфологічної будови території – наявністю значної кількості озер та улоговин.

Велике природоохоронне значення має наявність рідкісних рослинних угруповань, занесених до Зеленої книги України, яких тут нараховується 14. До них відносяться такі лісові угруповання: групи асоціацій соснових лісів зеленомохових та чорницевих, соснових лісів ялівцевих (з ялівцем звичайним), дубово-соснових лісів ліщинових. Серед болотної рослинності рідкісними є формації шейхцерієво-сфагнова та осоково-шейхцерієво-сфагнова, осоки Девелла, меч-трави болотної, а серед водної рослинності – формації альдрованди пухирчастої, латаття білого, латаття сніжно-білого, глечиків жовтих, їжачої голівки малої, рдесника червонуватого, рдесника тополистого, куширу підводного.

Західне Полісся є важливим регіоном для збереження глобально зникаючого виду птахів – очеретянки прудкої, середовищем існування таких видів, як глухар, коловодник ставковий, журавель сірий та ін., які в Європі знаходяться під загрозою зникнення. Цей регіон є дуже важливим місцем відпочинку птахів під час їх міграцій. Тут пересікаються два шляхи міграцій: північно-південний Біломоро-Балтійсько-Середземноморський та Поліський широтний. Загалом, під час весняних та осінніх міграцій в цьому районі зупиняються понад 10 тис. особин птахів. Найбільше під час міграцій тут збирається качок та гусей (особливо гуски сірої), численними є також мартин звичайний, лиска, норець великий, чайка, кулики: травник, веретенник великий та ін. Велике різноманіття водно-болотних та хижих птахів, серед яких багато рідкісних видів, спостерігається тут уже впродовж багатьох років.

Ґрунтовий покрив. Відповідно до схеми агрокліматичного районування України, досліджувана територія знаходиться в Західній провінції зони змішаних лісів типових дерново-підзолистих і оглеєних ґрунтів Українського Полісся. Мозаїчність рельєфу, складність геологічної будови, погана дренованість території, помірний клімат з достатнім балансом вологи зумовили формування різноманітних комплексів ґрунтів.

Ґрунти території досліджень формуються на молодих четвертинних льодовикових, водно-льодовикових, алювіальних і озерних відкладах під лісовою і лучною рослинністю. Переважаючими ґрунтоутворюючими процесами є підзолистий, дерновий і болотний в перезволожених місцях, з неглибоким заляганням ґрунтових вод. Різновидності ґрунтового покриву об’єднуються в чотири основні типи – підзолисті, дернові, лучні і болотні.

Найбільше поширення на території досліджень мають підзолисті (дерново-підзолисті і болотно-підзолисті) ґрунти механічного складу та різного ступеня опідзоленості та оглеєння. Вони займають понад 50% території (по парку – 30,5%). Розвиваючись на давньоалювіальних і флювіогляціальних відкладах, ґрунти цього типу характеризуються піщаним і супіщаним

механічним складом, високою водопроникністю і незначною вологопідйомною капілярністю. Близьке залягання ґрунтових вод веде до утворення оглеєних відмінностей. Дерново-підзолисті супіщані та суглинисті ґрунти характеризуються потужним гумусовим горизонтом (18-24 см) та наявністю 3-10 см суглинкових прошарків в алювіальному горизонті. pH водного розчину становить 5,3-5,5. Найменше забезпечені гумусом болотно-підзолисті ґрунти.

Дернові ґрунти сформувались під трав'янистою рослинністю на водно-льодовикових та давньоалювіальних відкладах. Вони характеризуються підвищеною родючістю (вміст гумусу 2,5-5%) та відносно потужнішим гумусовим горизонтом, який становить 15-30 см. В межах території найбільше поширення мають дерново-борові і дерново-глейові ґрунти. Дерново-борові ґрунти залягають на підвищених елементах рельєфу (вершинах дюн, піщаних горбах). Для них характерна відсутність ознак опідзолення. Глибина гумусового горизонту сягає 10-22 см. Дерново-глейові глинисто-піщані ґрунти залягають на більш вирівняних ділянках і мають достатньо високий ступінь оглеєності, що проявляється в наявності знебарвлених прошарків твердих залізо-марганцевих конкрецій різних розмірів. pH водного розчину становить 4,9–5,1. Обмежене поширення на території мають дерново-карбонатні ґрунти, які залягають на підвищених елементах рельєфу, де четвертинні відклади змиті. Реакція ґрунтового розчину в них лужна (pH 7,2-7,8).

В західній частині території в долині р. Західний Буг під трав'янистою рослинністю на алювіальних відкладах сформувалися лучні ґрунти. Вони характеризуються потужним гумусовим горизонтом (50-60 см) і високою потенційною родючістю (вміст гумусу в них досягає до 6%). В заплаві р. Прип'ять домінують лучно-болотні ґрунти, які характеризуються надмірним зволоженням і мають добре розвинений гумусовий профіль, у верхній частині якого міститься велика кількість нерозкладених рослинних решток.

Болотні ґрунти мають значне поширення по площі (23,6%, по парку – 30,4%) на плоских понижених заплавах рік, долинах стоку льодовикових вод та

озерно-алювіальних низовинах у місцях надмірного зволоження. Ґрунти характеризуються відсутністю суцільного шару торфу на поверхні і мають неглибокий (до 20–30 см) чорний в'язкий горизонт з великою кількістю напіврозкладених рослинних решток. Болотні ґрунти представлені верховими, перехідними і низинними типами, які відрізняються один від одного.

На пісках розвиваються торфи низької зольності.

За ботанічним складом торфовища поділяються на трав'яно-осокові, дерново-осокові, дерново-трав'яні різноманітні осоки, ситник, очерет, рогіз), деревинні (вільха, сосна, береза), мохові (ґіпнум, сфагнум). Після осушення процес розпаду сильно прискорюється та утворюються ґуміфіковані і перегнійні торфові ґрунти.

Відбувається еволюція гідроморфних ґрунтів під дією антропогенних факторів. При частому розпушуванні відбувається швидкий розклад органічної речовини. Переосушення цих ґрунтів призводить до різкого зниження врожайності. У Волинській області антропогенні мінеральні ґрунти після спрацювання осушених торфовищ займають 2% території області.

Ґрунти даного району дуже бідні на поживні речовини, кислі, часто перезволожені, мало придатні для господарського використання. 12-16% – орні землі, pH 5,2-5,8, багаті на органічну речовину та азот, характеризуються високою водоакумулюючою здатністю. Зольність – 7,6, N – 3,2, P_2O_5 – 0,23, K – 0,03, FeO – 1,4. Ступінь розкладу торфу за шкалою Поста – 25%; 30-35% кормові угіддя, заболочені, зарослі чагарниками.

В умовах зандрових та моренно-зандрових рівнин Полісся утворились досить однорідні за стратиграфічною будовою торфовища, де відсутні мінеральні прошарки (іноді тільки прошарок свідчить про торфові пожежі).

В цілому, торфові ґрунти – це специфічні природні екологічно дуже вразливі гідрогенні утворення, залучення яких в сільськогосподарське

використання потребує осушення. Вони займають 18,6% від площі сільськогосподарських угідь Волині.

В районі досліджень переважають торфові ґрунти низинного типу, які поділяються на евтрофні та алкалітрофні (карбонатні та залізо-карбонатні).

Торфові землі займають понижені елементи рельєфу: суцільні чи локальні масиви річкових заплав, замкнуті та слабопроточні улоговини.

Торфові землі мають у ландшафтах дуже важливі екологічні функції – гідрологічну, геохімічну, мікрокліматичну, флористичну, фауністичну, газорегулюючу. Нині світова практика землекористування визнала недоцільним осушувати гідроморфні ґрунти, екологічні функції яких надто важливі. Все більш актуальними стають проекти ренатуралізації раніше помилково осушених під інтенсивне землеробство гідроморфних земель.

Коротка характеристика геологічної будови та гідрогеологічних умов Шацького полігону

Геологічна будова. Територія дослідження головним чином розташована в межах Волинського палеозойського підняття, де встановлені відклади верхнього протерозою, нижнього і середнього кембрію, ордовику, силуру, верхньої крейди, олігоцену, неогену і четвертинні.

Відклади крейдової системи на території дослідження розвинені повсюдно і представлені породами, що належать до верхнього відділу. Залягають на розмитій поверхні верхнього протерозою, кембрію і силуру, перекриті, в основному, четвертинними, рідше палеогеновими утвореннями. Виходи їх на денну поверхню трапляються рідко. Потужність відкладів у межах території дослідження зростає зі сходу на захід від близько 15 м до 105 м. В товщі верхньої крейди виділяються відклади сеноманського, туронського і коньякського ярусів (сенонський над’ярус).

Породи сеноманського ярусу трапляються майже повсюди і покривають домезозойські відклади, залягають під осадами туронського ярусу і лише в районі с. Нова Руда виходять під четвертинні утворення. Представлені пісками, піщаниками, мергелями, рідше вапняками, конгломератами.

Відклади туронського ярусу в межах території, яка описується, розвинуті майже скрізь. Представлені писальною крейдою, яка місцями переходить у крейдоподібний мергель. В низах товщі подекуди крейда стає піщанистою і поступово переходить в піщанисті мергелі сеноману. Потужність туронських відкладів на території дослідження змінюється від 4,5-7 м у південно-східній його частині до 90-100 м – у північно-західній.

Відклади коньякського ярусу як складової сенонського над’ярусу розвинуті в західній і південно-західній частинах дослідження, де перекриті палеогеновими і четвертинними породами. Представлені писальною крейдою і крейдоподібними мергелями. Крейда біла, щільна, злегка крем’яниста, мергелі

світло-сірі щільні, подекуди піщанисті і глинисті. Потужність коньякських відкладів – біля 20 м.

Палеоген на території дослідження представлений верхнім відділом (харківською свитою). Відклади харківської свити (Pg3hr) залягають трансгресивно на нерівній поверхні верхньої крейди у вигляді окремих роз'єднаних островів, які залишились від розмиву. Представлені пісками кварцово-глауконітовими і кварцовими дрібно- і тонкозернистими, рідше середньозернистими глинистими зеленими, потужність становить 0–19 м.

Четвертинні утворення майже суцільним чохлом покривають верхньокрейдові і подекуди палеогенові відклади, за винятком незначних ділянок у долинах рік Стохід і Стир та в південно–східній частині дослідження в районі с. Карасин, де на денну поверхню виходять верхньокрейдяні породи. Представлені нижньо-, середньо- та верхньочетвертинними, а також сучасними утвореннями загальною потужністю від 0,3-80 м.

Нижньочетвертинні утворення поширені невеликими острівками на півночі території дослідження, де виповнюють пониження в крейдовому рельєфі. Представлені флювіогляціальними піщаними і піщано-гравійними відкладами лихвинського горизонту. Потужність – біля 20 м.

Нерозчленовані нижньо- і середньочетвертинні відклади представлені болотно-озерно-алювіальними утвореннями лихвинського і дніпровського горизонтів, розвинутими у вигляді окремих роз'єднаних острівків у районі населених пунктів Великий Обзир, Нова Руда, Мукомин, Любешів та ін. Представлені супісками світло-сірими і бурувато-сірими вапнистими, глинами сірими, голубувато-сірими тонкошаруватими, торфами бурувато-чорними і бурими, пісками кварцовими сірими дрібнозернистими глинистими. Потужність змінюється від 0,3 м (с. Красне) до 15-25 м (с. Седлище).

Середньочетвертинні відклади (Q_{II}) розвинуті майже повсюди і відсутні лише на порівняно невеликих ділянках у північній частині дослідження і

древніх долинах, де повністю розмиті. Залягають на глибинах від 0,4-54 м, представлені флювіогляціальними і льодовиковими утвореннями.

Верхньочетвертинні відклади представлені алювіальними відкладами (alQ_{III}) першої надзаплавної тераси Прип'яті, Стохода і Стиру та озерно-елювіальними ($1,alQ_{III}$) утвореннями, які залягають на флювіогляціальних, льодовикових і крейдяних породах. Переважають піски (понад 85%) за підпорядкованого значення суглинків, супісків, мулу та торфу. Потужність прошарків і лінз суглинків, супісків і глин змінюється від 0,05-4 м. Потужність озерно-елювіальних відкладів коливається від 0,5-1 до 15-20 м.

Сучасні відклади в межах дослідження представлені алювіальними, озерними, болотними та еоловими утвореннями, які сформувалися у післяльодовикову епоху.

Алювіальні відклади (aQ_{IV}) розвинуті в заплаві Прип'яті, Стохода і Стиру, їх приток та ручаїв. Представлені пісками, супісками та глинами. В заплаві Прип'яті вони майже скрізь перекриті болотними утвореннями. Потужність покладів – 6-7 м.

Озерні відклади ($1Q_{IV}$) – піски кварцові жовтувато-бурі і світло-жовті, зі значним вмістом напіврозкладених рослинних залишків, з прошарками і лінзами темно-сірого мулу і супісків. В понижених ділянках переважає торф'янистий мул. Озерні відклади підстилаються верхньочетвертинними елювіальними відкладами, рідше – флювіогляціальними і льодовиковими. Потужність їх 1-8 м.

Болотні відклади (bQ_{IV}) широко розвинуті в межиріччі і заплавах Стохода і Стиру та в заплавах р. Прип'ять та її приток. Представлені торфами, під якими переважно залягають піски бурі і світло-сірі дрібнозернисті, а також супіски і суглинки. Потужність змінюється від 0,5 до 2-3 м, подекуди досягає 5 м.

Еолові утворення ($_{V}Q_{IV}$) існують у вигляді гряд, валів, горбів, дюн. Представлені пісками кварцовими різнозернистими, в основному середньозернистими, відсортованими, з незначними домішками глинистої фракції, з характерною шаруватістю. Піщані горби, гряди, дюни сягають висоти 15–17 м.

Гідрогеологічні умови. Описуваний район знаходиться в північній частині Волино-Подільського артезіанського басейну, геологічна будова якого, його геоморфологічні особливості і кліматичні умови сприяють постійному поповненню запасів широко розвинутих тут прісних підземних вод, приурочених до четвертинних, палеогенових, верхньокрейдяних, силурійських, середньокембрійських, валдайських, волинських і поліських утворень.

Додаток Ж

ПАТЕНТ УКРАЇНИ НА ВИНАХІД № 104340

УКРАЇНА

ПАТЕНТ

НА ВИНАХІД

№ 104360

СПОСІБ ФРАКТАЛЬНОЇ СПЕКТРОМЕТРИЧНОЇ ФІТОІНДИКАЦІЇ ВИЯВЛЕННЯ АНОМАЛІЙ ПРИРОДНОГО ТА ТЕХНОГЕННОГО ПОХОДЖЕННЯ

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на винаходи **27.01.2014.**

Голова Державної служби
інтелектуальної власності України — М.В. Ковіня

Державна служба інтелектуальної власності України
Ідентифікаційний код 37552556
№1

Додаток 3

АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор ЦАКДЗ
академік НАН України

В.І. Лялько
«17» 06 2016

ЗАТВЕРДЖУЮ
Генеральний директор
ТОВ «Баришівська зернова компанія»

В.П. Безсмертний
«17» 06 2016

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ
(приймання-передачі матеріалів науково-дослідних розробок)

Ми, що нижче підписалися, завідувач лабораторії дослідження природних ресурсів дистанційними методами відділу енергомасообміну в геосистемах Державної установи "Науковий Центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України" (ЦАКДЗ ІГН НАНУ), доктор геологічних наук Сахацький О.І., старший науковий співробітник відділу ЕМОГС ЦАКДЗ ІГН НАНУ, кандидат біологічних наук Жолобак Г.М., головний приладист ЦАКДЗ ІГН НАНУ Дугін С.С. з одного боку та начальник планово-економічного відділу ТОВ «Баришівська зернова компанія» Заглада Є.В., перший заступник генерального директора Черемха Б.М. та головний агроном Коваль О.Ю. з іншого боку, склали цей акт про те, що ЦАКДЗ ІГН НАНУ передає, а ТОВ «Баришівська зернова компанія» приймає цифрову оглядову карту-схему розташування посівів основних сільськогосподарських культур південних та південно-східних районів Київської області під урожай 2015 року, що включає посіви в межах Баришівського, Яготинського та Переяслав-Хмельницького районів. Карта-схема створена на основі класифікованих даних космічних знімків Landsat TM за 2015 р.

Карта-схема та короткий опис до неї з даними наземних спектрометричних вимірів будуть використані для моніторингу посівних площ та планування заходів контролю за врожайністю посівів ТОВ «Баришівська зернова компанія».

Від ЦАКДЗ ІГН НАНУ

завідувач лабораторії
відділу ЕМОГС ЦАКДЗ ІГН НАНУ
доктор геологічних наук

_____ О.І. Сахацький

старший науковий співробітник відділу
ЕМОГС ЦАКДЗ ІГН НАНУ, кандидат
біологічних наук

_____ Г.М. Жолобак

головний приладист ЦАКДЗ ІГН НАНУ

_____ С.С. Дугін

провідний інженер відділу ЕМОГС
ЦАКДЗ ІГН НАНУ

_____ М.В. Ваколюк

Від ТОВ «Баришівська зернова компанія»

Начальник планово-економічного відділу
ТОВ «Баришівська зернова компанія»

_____ Є.В. Заглада

Перший заступник генерального директора
ТОВ «Баришівська зернова компанія»

_____ Б.М. Черемха

Головний агроном ТОВ «Баришівська
зернова компанія»

_____ О.Ю. Коваль

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор ЦАКДЗ
академік НАН України

В.І. Лялько
«17» 06 2016

ЗАТВЕРДЖУЮ
Генеральний директор
ТОВ «Баришівська зернова компанія»

В.П. Безсмертний
«17» 06 2016

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ
(приймання-передачі матеріалів науково-дослідних розробок)

Ми, що нижче підписалися, завідувач лабораторії дослідження природних ресурсів дистанційними методами відділу енергомасообміну в геосистемах Державної установи "Науковий Центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України" (ЦАКДЗ ІГН НАНУ), доктор геологічних наук Сахацький О.І., старший науковий співробітник відділу ЕМОГС ЦАКДЗ ІГН НАНУ, кандидат біологічних наук Жолобак Г.М. та головний приладист Дугін С.С. з одного боку та начальник планово-економічного відділу ТОВ «Баришівська зернова компанія» Заглада Є.В., перший заступник генерального директора Черемха Б.М. та головний агроном Коваль О.Ю. з іншого боку, склали цей акт про те, що ЦАКДЗ ІГН НАНУ передає, а ТОВ «Баришівська зернова компанія» приймає цифрову оглядову карту-схему розташування посівів озимих зернових культур південно-східних районів Київської області під урожай 2016 року, що включає посіви в межах Баришівського, Яготинського та Переяслав-Хмельницького районів. Карта схема створена на основі класифікованих даних космічних знімків Landsat TM та Sentinel-2 за 2016 р.

Карта-схема та короткий опис до неї з даними наземних спектрометричних вимірів будуть використані для моніторингу посівних площ та планування заходів контролю за врожайністю посівів озимих культур ТОВ «Баришівська зернова компанія».

Від ЦАКДЗ ІГН НАНУ

завідувач лабораторії
відділу ЕМОГС ЦАКДЗ ІГН НАНУ
доктор геологічних наук

_____ О.І. Сахацький

головний приладист ЦАКДЗ ІГН НАНУ

_____ С.С. Дугін

провідний інженер відділу ЕМОГС
ЦАКДЗ ІГН НАНУ

_____ М.В. Ваколюк

Від ТОВ «Баришівська зернова компанія»

Начальник планово-економічного відділу
ТОВ «Баришівська зернова компанія»

_____ Є.В. Заглада

Перший заступник генерального директора
ТОВ «Баришівська зернова компанія»

_____ Б.М. Черемха

Головний агроном ТОВ «Баришівська зернова компанія»

_____ О.Ю. Коваль